

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Otimização de Procedimentos para o Ensaio de Cabos Isolados de AT e MT

Fábio Renato Lopes Branco

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. António Carlos Sepúlveda Machado e Moura
Coorientador: Eng.º Paulo Luís Almeida

Fevereiro de 2014

Resumo

A recente instalação do Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LAT-FEUP) tem como principais objetivos a criação de condições para fomentar a investigação na área dos Ensaios Elétricos de AT, bem como apoiar o forte polo industrial na área dos Sistemas Elétricos de Energia e seus componentes que se encontra localizado na região Norte. Com esse propósito torna-se útil que o LAT-FEUP adquira capacidades para a realização de diversos tipos de ensaios a equipamentos de âmbito elétrico.

Atendendo à necessidade de alimentar consumidores ao nível de Alta e Média Tensão, é por vezes necessário recorrer a cabos isolados em detrimento de linhas aéreas. A realização de ensaios a estes equipamentos é uma etapa essencial para assegurar elevados padrões de qualidade, permitindo desta forma que as empresas de fabricantes de cabos de energia possam dar garantias de qualidade aos seus clientes. Estes clientes são normalmente as Operadoras das Redes Elétricas de Transporte e Distribuição, as quais procuram manter ou mesmo aumentar os seus índices de fiabilidade nas suas redes. Para esses índices de fiabilidade contribuem todos os equipamentos utilizados na exploração das redes, entre os quais os cabos isolados.

A exigência de qualidade por parte dos clientes relativamente aos fabricantes de cabos assume por vezes padrões tão elevados que é necessário recorrer à validação dos ensaios que foram realizados pelo próprio fabricante, por Laboratórios Independentes para comprovar os requisitos de qualidade. Tomando este facto como ponto de partida e também porque foi instalado recentemente, o LAT-FEUP poderá desempenhar esse papel de Laboratório Independente, apoiando assim os fabricantes de cabos isolados.

Neste trabalho será analisado todo o processo dos ensaios a cabos isolados de AT e MT em Laboratório, e será tido em conta todos os equipamentos utilizados, as normas internacionais aplicáveis, os procedimentos operacionais e os respetivos parâmetros de avaliação de cada ensaio. Também com o presente estudo pretende-se identificar quais os tipos de ensaios existentes que mais se enquadram numa futura implementação no LAT-FEUP, assim como possíveis limitações existente na sua implementação.

Em suma, com o presente estudo pretende-se identificar todo o procedimento operacional para a realização dos ensaios a cabos isolados de AT e MT, tendo como intuito fornecer alguma documentação de apoio a uma futura implementação destes ensaios no LAT-FEUP.

Palavras-chaves: Laboratório, Ensaios, Procedimentos Operacionais.

Abstract

The recent installation of the High Voltage Laboratory of the Faculty of Engineering of the University of Porto (LAT-FEUP) have as the main goals the creation of conditions to incentivize the research focused on Electrical Testing High Voltage, as well as support the strong industrial community focused on Electric Power Systems that is located in this northern region surroundings. With these purpose, it's useful that the lab becomes capable to realize several types of tests to electrical components.

Bearing in mind the necessity to supply consumers in both Medium and High voltage levels, sometimes is necessary to use insulated cables instead of overhead lines. The test of these components is an essential step to certify high quality standards, allowing the cable manufacturers to ensure the quality of these components upon their sale to their clients. These clients are typically the Transmission and Distribution System Operators, which want to keep or even increase their grid's reliability indexes. All the components in Transmission and Distribution grids contribute to these indices, namely insulated cables.

The quality standard required by the clients with respect to the cables they buy is so high that sometimes it's necessary to validate the tests performed by the manufacturers through a new set of tests In Independent Laboratories. Taking this fact as the starting point, and also the due to its recent installation, the LAT-FEUP laboratory can perform the role as an independent laboratory, supporting the manufacturers of insulated cables.

In this work the full process of Medium and High voltage insulated cables testing will be thoroughly analyzed, taking into account all the necessary equipment, the international standards that are applicable, the operational procedures and the evaluation parameters of each test. This study also aims to identify the different types of tests that are more suited for a future implementation in the LAT-FEUP lab, as well as possible constraints in their implementation.

In short, this study aims to identify all the operational Procedure for the testing of Medium and High voltage insulated cables, with the objective of constituting a reference work to support a future implementation of the tests in the LAT-FEUP lab.

Keywords: Operational Procedures, Insulated Cables Tests, High Voltage Tests

Agradecimentos

A elaboração desta dissertação não teria sido possível sem a colaboração de várias pessoas. Não poderia deixar de demonstrar o meu apreço e agradecimento para as mesmas.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura. O meu muito obrigado por toda a disponibilidade, conselhos, orientações e motivação que forneceu durante este período, não deixando também de agradecer pelo contributo que deu durante toda a minha formação académica onde através do seu profissionalismo, conduta, conhecimentos e experiência se tornou, para mim, num modelo a seguir.

Ao meu orientador na empresa, Sr. Engenheiro Paulo Luís Almeida, da Solidal, agradeço a disponibilidade, documentação fornecida, os conselhos e orientações dadas.

À Administração da Solidal - Condutores Elétricos, SA, especialmente ao Sr. Engenheiro José Cardoso Pereira, que possibilitou a realização deste trabalho de campo na empresa.

Aos colaboradores do Serviço de Laboratórios pelo apoio e disponibilidade fundamentais para a realização deste trabalho, especialmente o contributo do Sr. Rosendo Silva e do Sr. Paulo Santa Marinha.

Aos colaboradores do LAT-FEUP, os Engenheiros Nuno Soares e José Queirós pela disponibilidade e pelo apoio prestado.

Aos meus amigos, que não só no desenvolvimento desta dissertação, mas também durante todo o percurso académico estiveram presentes nos bons e maus momentos sempre com palavras de consolo e motivação e sem os quais certos obstáculos teriam sido mais difíceis de ultrapassar. Ao David Fernandes, Eduarda Sousa e ao José Pedro Magalhães pelo apoio incondicional que me deram nesta fase tão crucial da minha vida. E um outro agradecimento especial a um grande amigo, ao Jorge Gonçalves por toda a disponibilidade, dicas e incentivo no trabalho, mesmo à distância não deixou de estar presente no apoio.

Por fim, mas não menos importante, aos meus pais, irmão e avós agradeço tudo o que me proporcionaram ao longo da vida.

Índice

Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 - Motivação e Objetivos	2
1.2 - Estrutura da Dissertação.....	2
Capítulo 2	5
Aspetos Construtivos e Elétricos	5
2.1 - Aspetos Construtivos	5
2.1.1 - Alma condutora	6
2.1.2 - Camadas semicondutoras.....	7
2.1.3 - Camada isolante	8
2.1.4 - Revestimentos metálicos	9
2.1.5 - Revestimentos não metálicos.....	11
2.1.6 - Bloqueio longitudinal à penetração de água	11
2.2 - Aspetos Elétricos.....	12
2.2.1 - Tensão estipulada dos cabos de AT e MT	12
2.2.2 - Gradiente de potencial	12
2.2.3 - Fator de perdas dielétricas	14
2.2.4 - Capacidade.....	14
2.2.5 - Perdas dielétricas.....	15
2.3 - Considerações Finais	15
Capítulo 3	17
Controlo da Qualidade	17
3.1 - Ensaios Laboratoriais de Controlo da Qualidade	17
3.2 - Condições Gerais de Ensaio	19
3.3 - Especificações de Ensaios a Cabos de MT	19

3.3.1 - Ensaaios de Rotina	20
3.3.1.1 - Medição da resistência elétrica	20
3.3.1.2 - Medição de descargas parciais	21
3.3.1.3 - Ensaio de tensão	21
3.3.2 - Ensaaios de Amostra	22
3.3.2.1 - Ensaio de tensão (4 horas)	23
3.3.3 - Ensaaios de Tipo	23
3.3.3.1 - Ensaio de enrolamento	24
3.3.3.2 - Medição de descargas parciais	24
3.3.3.3 - Medição da $\tan \delta$	25
3.3.3.4 - Ensaio de ciclos de aquecimento	25
3.3.3.5 - Ensaio de choque atmosférico	26
3.3.3.6 - Ensaio de tensão (4 horas)	28
3.3.3.7 - Medição da resistividade elétrica dos semicondutores	28
3.3.3.8 - Ensaio de penetração de água	28
3.4 - Especificações de Ensaaios a Cabos de AT	29
3.4.1 - Ensaaios de Rotina	29
3.4.1.1 - Medição de descargas parciais	29
3.4.1.2 - Ensaio de tensão	30
3.4.1.3 - Ensaio de rigidez dielétrica de bainhas exteriores	31
3.4.2 - Ensaaios de Amostra	31
3.4.2.1 - Medição da resistência elétrica	31
3.4.2.2 - Medição da capacidade	32
3.4.2.3 - Ensaio de choque atmosférico	32
3.4.2.4 - Ensaio de penetração de água	32
3.4.3 - Ensaaios de Tipo	33
3.4.3.1 - Ensaio de enrolamento	33
3.4.3.2 - Medição de descargas parciais	34
3.4.3.3 - Medição da $\tan \delta$	35
3.4.3.4 - Ensaio de ciclos de aquecimento	35
3.4.3.5 - Ensaio de choque atmosférico	36
3.4.3.6 - Ensaio de tensão	37
3.4.4 - Ensaaios de Pré-Qualificação	37
3.4.4.1 - Ensaio de ciclos de aquecimento	38
3.4.4.2 - Ensaio de choque atmosférico	39
3.4.4.3 - Extensão do ensaio de pré-qualificação	39
3.5 - Resumo	41

Capítulo 4	43
Laboratório de Alta Tensão	43
4.1 - Equipamentos Gerais	43
4.1.1 - Equipamento de ensaio ao choque	43
4.1.2 - Equipamento de ensaio à frequência industrial	47
4.2 - Equipamentos Específicos	49
4.3 - Limitações do LAT-FEUP	59
4.4 - Resumo	60
Capítulo 5	61
Procedimentos de Ensaios	61
5.1 - Preparação das extremidades de cabo.....	61
5.2 - Colocação de sondas de temperatura	62
5.3 - Procedimentos Operacionais.....	63
5.3.1 - Ensaio de penetração de água.....	63
5.3.2 - Ensaio de tensão	67
5.3.3 - Ensaio de rigidez dielétrica de bainhas exteriores.....	70
5.3.4 - Ensaio de ciclos de aquecimento.....	71
5.3.5 - Ensaio de choque atmosférico.....	76
5.3.6 - Medição de descargas parciais.....	79
5.3.7 - Medição da resistência elétrica	82
5.3.8 - Medição da resistividade elétrica dos semicondutores.....	83
5.3.9 - Medição da $\tan \delta$	87
5.3.10 - Medição da capacidade.....	91
5.4 - Resumo	93
Capítulo 6	95
Conclusões e Trabalhos Futuros	95
6.1 - Principais Conclusões	95
6.2 - Contribuições da Dissertação	97
6.3 - Limitações.....	98
6.4 - Possíveis Trabalhos Futuros	98
Referências.....	99
Anexos.....	101
Anexo A - Fatores de correção de temperatura	101
Anexo B - Características Gerais do Equipamentos Utilizados nos Ensaios	102
Anexo C - Limitações de Equipamentos de Ensaio no LAT-FEUP	103

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Exemplo de um cabo isolado monopolar [1].	5
Figura 2.2 - Exemplo de um cabo isolado tripolar [1].	5
Figura 2.3 - Constituição típica de um cabo isolado de AT [1].	6
Figura 2.4 - Secções de almas condutoras [1].	7
Figura 2.5 - Cabos de campo radial e não radial [2].	10
Figura 2.6 - Distribuição do Campo Elétrico no isolamento de um cabo [4].	13
Figura 2.7 - Circuito equivalente de um condensador ideal e fator de perdas dielétrica [2].	14
Figura 3.1 - Onda de choque típica de uma descarga atmosférica [6].	27
Figura 3.2 - Exemplo de disposição para o ensaio de pré-qualificação [8].	38
Figura 3.3 - Exemplo da disposição de um sistema pré-qualificado com um outro conjunto não pré-qualificado [8].	40
Figura 4.1 - Gerador de choque.	45
Figura 4.2 - Divisor de tensão.	45
Figura 4.3 - Unidade de alimentação.	46
Figura 4.4 - Unidade de comando e DIAS.	46
Figura 4.5 - Transformador de tensão.	47
Figura 4.6 - Divisor de tensão.	48

Figura 4.7 - Regulador de alimentação.	48
Figura 4.8 - Controlador.	49
Figura 4.9 - Calibrador.	50
Figura 4.10 - Condensador.	51
Figura 4.11 - Detetor de descargas parciais.	51
Figura 4.12 - Aparelhagem de medição de descargas parciais.	52
Figura 4.13 - Aparelhagem de controlo.	52
Figura 4.14 - Terminal fim de cabo a óleo.	53
Figura 4.15 - Terminais fim de cabo a água.	53
Figura 4.16 - Aparelhagem do circuito hidráulico dos terminais fim de cabo a água.	54
Figura 4.17 - Sistema de refrigeração dos terminais fim de cabo a água.	54
Figura 4.18 - Fonte de alimentação de corrente contínua.	55
Figura 4.19 - Microhmímetro.	55
Figura 4.20 - Estufa.	56
Figura 4.21 - Transformador toroidal.	56
Figura 4.22 - Transformador de corrente (TI).	56
Figura 4.23 - Aparelho de penetração de água.	57
Figura 4.24 - Sondas de temperatura.	57
Figura 4.25 - Sistema de comando e controlo de temperatura.	58
Figura 4.26 - Condensador padrão.	58
Figura 4.27 - Ponte de medição da capacidade e $\tan \delta$	59
Figura 5.1 - Aparelho de desnudamento das extremidades de cabo.	62
Figura 5.2 - Modo de preparar as extremidades de cabo, para terminais fim de cabo de óleo [9].	62

Figura 5.3 - Modo de preparar as extremidades de cabo, para terminais fim de cabo de água da Haefely, modelo CTT 250 (adaptado de [9]).	62
Figura 5.4 - Montagem de sondas de temperatura nas almas condutoras [8].	63
Figura 5.5 - Esquema do aparelho de penetração de água [10].	64
Figura 5.6 - Esquema base de montagem do ensaio de penetração de água.	66
Figura 5.7 - Montagem do ensaio de penetração de água.	66
Figura 5.8 - Exemplo de outra montagem do ensaio de penetração de água.	67
Figura 5.9 - Esquema base de montagem do ensaio de tensão.	68
Figura 5.10 - Montagem do ensaio de tensão (ensaio de rotina).	69
Figura 5.11 - Montagem do ensaio de tensão (ensaio de tipo).	69
Figura 5.12 - Montagem de ensaio de rigidez dielétrica de bainhas exteriores.	71
Figura 5.13 - Esquema base de montagem do ensaio de ciclos de aquecimento, cabos de MT.	73
Figura 5.14 - Montagem do cabo testemunho.	74
Figura 5.15 - Esquema base de montagem do ensaio de ciclos de aquecimento, cabos de AT.	75
Figura 5.16 - Montagem do ensaio de ciclos de aquecimento, na amostra principal.	76
Figura 5.17 - Esquema base de montagem do ensaio de choque atmosférico.	77
Figura 5.18 - Montagem do ensaio de choque atmosférico, na amostra principal.	79
Figura 5.19 - Esquema base de montagem para medição de descargas parciais, cabos de MT (ensaio de tipo).	80
Figura 5.20 - Esquema base de montagem para medição de descargas parciais, cabos de AT (ensaio de tipo).	82
Figura 5.21 - Montagem da Medição da Resistência Elétrica.	83
Figura 5.22 - Preparação da amostra para a medição da resistividade do semicondutor interno [11].	84

Figura 5.23 - Preparação da amostra para medição da resistividade do semicondutor externo [11].	85
Figura 5.24 - Esquema elétrico do princípio de funcionamento [11].....	86
Figura 5.25 - Montagem do ensaio de medição da resistividade elétrica dos semicondutores.	86
Figura 5.26 - Modo de preparar as extremidades de cabo para o ensaio de medição da $\tan \delta$, para terminais fim de cabo a água da Haefely modelo CTT 250 (adaptado de [9]). ..	88
Figura 5.27 - Esquema base de montagem do ensaio de medição da $\tan \delta$	89
Figura 5.28 - Montagem do ensaio de medição da $\tan \delta$, na amostra principal.....	90
Figura 5.29 - Esquema base de montagem do ensaio de medição da capacidade.	92
Figura 5.30 - Montagem do ensaio de medição da capacidade (ensaio de amostra).	92

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Temperaturas máximas admissíveis para os diferentes materiais dielétricos.	8
Tabela 3.1 - Tensões a aplicar no ensaio de tensão, segundo a IEC 60502-2.	22
Tabela 3.2 - Número de amostras por comprimento, segundo a IEC 60502-2.	22
Tabela 3.3 - Tensões a aplicar no ensaio de tensão 4h, segundo IEC 60502-2.	23
Tabela 3.4 - Valores máximos a considerados para a $\tan \delta$, para cada tipo de isolamento, segundo a IEC 60502-2.	25
Tabela 3.5 - Tensões (valor de pico) a aplicar no ensaio de choque atmosférico, segundo a IEC 60502-2.	27
Tabela 3.6 - Tensões para a medição de descargas parciais com base da U_0 , segundo IEC 60840.	30
Tabela 3.7 - Tensões de referência para o ensaio de tensão, segundo IEC 60840.	30
Tabela 3.8 - Tensão usada no ensaio de choque atmosférico, segundo IEC 60840.	32
Tabela 3.9 - Tensão aplicada no ensaio $\tan \delta$, segundo IEC 60840.	35
Tabela 3.10 - Valores máximos admissíveis da $\tan \delta$, segundo IEC 60840.	35
Tabela 3.11 - Valor da tensão de teste aplicada ao ensaio de ciclos de aquecimento, segundo IEC 60840.	36

Tabela A.1 - Fatores de correção da temperatura da resistência do condutor para 20°C, segundo IEC 60228.	101
Tabela B.1 - Listagem dos equipamentos utilizados nos ensaios laboratoriais.	102
Tabela C.1 - Comparação dos equipamentos existentes nos LAT´s, para a realização dos ensaios.	103

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

AT	Alta Tensão
DIAS	<i>Digital Impulse Analysis System</i> – Sistema Digital de Análise do Impulso
EPR/HEPR	Borracha Etil-Propílica
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HDPE	Polietileno de Alta Densidade
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> – Comissão Eletrotécnica Internacional
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LAT	Laboratório de Alta Tensão
LMAT	Laboratório de Muita Alta Tensão
LAT-FEUP	Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
MAT	Muita Alta Tensão
MT	Média Tensão
PE	Polietileno
PVC	Policloreto de Vinilo
XLPE	Polietileno Reticulado

Lista de símbolos

U_0	Tensão simples (kV)
U	Tensão composta (kV)
U_m	Tensão máxima de isolamento (kV)
$\tan \delta$	Fator de perdas dielétricas
δ	Ângulo de perdas dielétricas
pC	Picocoulomb
C	Capacidade linear (F/m)

ε	Permitividade relativa do isolamento
D_i	Diâmetro externo do isolamento (excluindo o semicondutor externo) (mm)
d_c	Diâmetro do condutor (incluindo o semicondutor interno) (mm)
E_i	Gradiente de potencial à superfície do condutor (V/mm)
E_0	Gradiente de potencial à superfície do isolamento (V/mm)
D_{io}	Diâmetro exterior nominal do isolamento (mm)
d_{ii}	Diâmetro interior declarado do isolamento (mm)
t_n	Espessura nominal do isolamento (mm)
W_d	Perdas no dielétrico do condutor (W/m)
ω	Frequência angular da rede ($2\pi f$) (rad/s)
R_{20}	Resistência do condutor a 20 °C (Ω/km)
R_t	Resistência do condutor medido (Ω)
K_t	Fator de correção da temperatura
L_c	Comprimento do cabo (m)
ρ_i	Resistividade do semicondutor interno ($\Omega\cdot\text{m}$)
ρ_e	Resistividade do semicondutor externo ($\Omega\cdot\text{m}$)
R	Resistência do circuito de ensaio (Ω)
L	Distância entre os elétrodos de potencial (m)
D	Diâmetro exterior do semicondutor interno (m)
d	Diâmetro exterior do condutor (m)
S	Secção do semicondutor externo (m^2)

Capítulo 1

Introdução

Hoje em dia as sociedades modernas estão muito dependentes do fornecimento de energia elétrica. Para tal basta constatar o que acontece em grandes cidades quando não há fornecimento de energia elétrica, simplesmente um caos. Nesse sentido, é fundamental que todas as entidades que operam no sector elétrico como as empresas produtoras ou as Operadoras das Redes de Transporte e de Distribuição ofereçam garantias de qualidade e continuidade de serviço no fornecimento de eletricidade, em que a mínima perturbação no seu fornecimento leva a enormes inconvenientes no quotidiano das populações, como avultados prejuízos económicos.

Com o intuito de evitar ao máximo tais perturbações nas sociedades modernas, uma especial atenção deve ser tida em conta, por parte das Operadoras de Transporte e de Distribuição de energia elétrica, relativamente aos equipamentos que utilizam nas suas redes, exigindo aos fabricantes e fornecedores padrões mínimos de garantias e qualidade nos produtos.

Atendendo aos equipamentos que veiculam a energia elétrica entre os locais de geração e os consumidores, linhas aéreas e cabos subterrâneos, os fabricantes destes equipamentos têm que cumprir rigorosamente critérios de qualidade. Um dos exemplos pertinentes é o controlo de qualidade do processo de produção dos cabos isolados. Para tal, os cabos isolados ao fim do processo de produção são sujeitos a inúmeros ensaios laboratoriais para controlo de qualidade, com o intuito de verificar se estes apresentam anomalias e estão em conformidade com as características estabelecidas pelo fabricante. O controlo de qualidade dos cabos isolados é conseguido através da validação de ensaios laboratoriais, efetuados pelos próprios fabricantes de cabos, sendo normalmente realizados dois tipos de ensaios: os de cariz não elétricos e os de cariz elétrico.

A realização destes ensaios visam comprovar as características pré-estabelecidas pelo fabricante, comprovando assim aos seus clientes que os cabos isolados estão em conformidade com os padrões de qualidade internacionais.

1.1 - Motivação e Objetivos

A presente dissertação visa apoiar o Laboratório de Alta Tensão de Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto (LAT-FEUP) recentemente inaugurado, o qual está vocacionado para prestar apoio à indústria. Presentemente o LAT-FEUP já possui capacidade para realizar ensaios a materiais dielétricos.

Uma vez que o LAT-FEUP está a dar os primeiros passos para a realização de diversos ensaios, a presente dissertação visa constituir um documento de apoio à decisão de forma a permitir que o LAT-FEUP adquira, num futuro próximo, competências para a realização de ensaios a cabos isolados de AT e MT, permitindo assim auxiliar a indústria deste ramo, nos diversos ensaios realizados de cariz elétrico ou em eventuais parcerias no desenvolvimento de novas tecnologias para cabos isolados.

Com o propósito de auxiliar o LAT-FEUP, a presente dissertação tem como objetivo principal o estudo dos procedimentos de ensaios a cabos isolados de AT e MT. Neste sentido, o objetivo principal compreende várias etapas:

- Levantamento dos ensaios realizados em Laboratórios de Alta Tensão;
- Estudo e levantamento das normas internacionais aplicáveis aos ensaios;
- Levantamento dos equipamentos necessários à realização dos ensaios;
- Acompanhamento de ensaios laboratórios aos cabos isolados de AT e MT;
- Definição de procedimentos operacionais para a realização dos ensaios;
- Estudo e análise dos ensaios que se enquadram no LAT-FEUP.

1.2 - Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos. O capítulo 1 contextualiza o tema abordado e enquadra-o com o âmbito deste trabalho, cuja descrição detalhada é apresentada nos capítulos subsequentes.

O capítulo 2 consiste numa breve revisão das características construtivas dos cabos isolados de AT e MT, sendo ainda abordados alguns aspetos de cariz elétrico, de forma a permitir uma melhor contextualização e familiarização com os aspetos construtivos e elétricos referidos nos capítulos seguintes.

No capítulo 3 são apresentados e analisados os vários tipos de ensaios realizados aos cabos isolados de AT e MT, os quais estão na base do controlo da qualidade, especificados nas normas da IEC. Este capítulo possibilita a compreensão dos ensaios realizados nos diversos tipos de ensaios existentes nas normas estudadas para os cabos isolados de AT e MT, IEC

60840 e IEC 60502-2 respetivamente, bem como permitindo compreender todo o procedimento teórico abordados nas normas para a realização dos ensaios.

O capítulo 4 foca-se no levantamento dos equipamentos utilizados nos ensaios cabos isolados. Numa primeira fase é realizado um levantamento dos equipamentos existente no LAT-FEUP e numa segunda fase é realizado um levantamento dos equipamentos específicos utilizados para a realização dos ensaios a cabos isolados, por parte de um fabricante de cabos. Por fim é efetuado uma comparação dos equipamentos existentes entre LAT-FEUP e o fabricante de cabos (Solidal), de forma a verificar as limitações de equipamentos que o LAT-FEUP possui para a realização dos diversos ensaios.

No capítulo 5 são apresentados os procedimentos operacionais utilizados nos laboratórios da empresa Solidal para a realização dos diversos ensaios a cabos isolados de AT e MT mencionados no capítulo 3, em conformidade com as normas IEC 60502-2 e IEC 60840. A descrição do procedimento operacional para cada ensaio é acompanhada por um levantamento dos equipamentos utilizados, bem como do modo operacional e respetivos esquemas de ensaios.

Por último, o capítulo 6 faz referência às principais conclusões, limitações e contribuições desta dissertação, bem como a sugestões de possíveis trabalhos futuros.

4 Introdução

Capítulo 2

Aspetos Construtivos e Elétricos

Neste capítulo são abordadas as características construtivas dos cabos isolados de AT e MT, as quais servem de base e enquadram os capítulos seguintes.

2.1 - Aspetos Construtivos

Os aspetos construtivos dos cabos isolados de AT e MT são muito semelhantes, embora existam algumas diferenças quanto à sua configuração. Os cabos de MT apresentam duas configurações: monopolar (Figura 2.1) e multipolar (em geral tripolar, conforme representado na Figura 2.2). No que diz respeito aos cabos de AT, estes são unicamente do tipo monopolar.



Figura 2.1 - Exemplo de um cabo isolado monopolar [1].



Figura 2.2 - Exemplo de um cabo isolado tripolar [1].

Seguidamente são apresentados todos os aspetos construtivos que fazem parte dos cabos isolados de AT e MT, estando representada na Figura 2.3 a constituição típica.

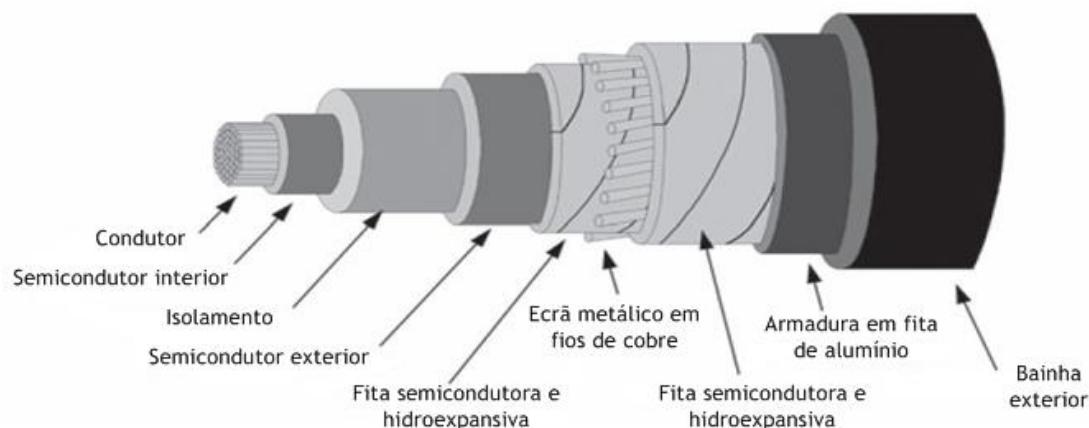


Figura 2.3 - Constituição típica de um cabo isolado de AT [1].

2.1.1 - Alma condutora

A alma condutora (condutor) é o elemento constituinte responsável pela condução da corrente elétrica, caracterizando-se principalmente pela natureza do metal condutor, pela secção nominal e pela sua composição, as quais condicionam a flexibilidade e a resistência ôhmica do condutor [1].

Quanto à natureza do metal condutor a alma condutora pode ser constituída por:

- Cobre recozido, nu ou estanhado;
- Alumínio, geralmente 3/4 duro;
- Ligas de alumínio (resistência mecânica superior ao alumínio).

Relativamente à composição, a alma condutora pode ser:

- **Maciça:** constituídas por um único condutor sólido, normalmente, para secções não muito elevadas;
- **Multifilar:** constituídas por diversos fios cableados entre si, conferindo ao conjunto uma maior flexibilidade.

No caso de uma alma condutora multifilar, os fios são dispostos em hélice numa ou várias camadas distintas, sendo o sentido de cableamento alternado entre camadas sucessivas.

No que diz respeito às secções das almas condutoras, representadas na Figura 2.4 são, geralmente, circulares ou setoriais. Esta última disposição é usada sobretudo nos cabos com 3 e 4 condutores, permitindo uma melhor ocupação do espaço destinados aos mesmos e, conseqüentemente, uma diminuição das dimensões e do peso do cabo.

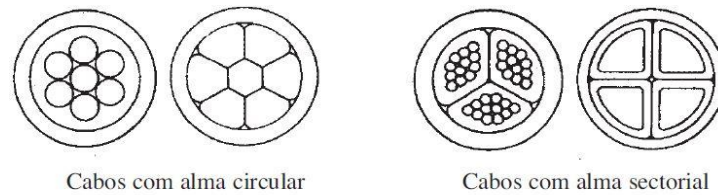


Figura 2.4 - Seções de almas condutoras [1].

As almas condutoras com secção circular são, por sua vez, constituídas por camadas concêntricas. No entanto para secções elevadas, normalmente acima de 800 mm², pode proceder-se à segmentação da alma condutora, sendo esta composta por vários elementos cableados de forma setorial, podendo ser ligeiramente isolados entre si. Esta estrutura tem como objetivo a redução dos efeitos pelicular e de proximidade, com a consequente redução da resistência óhmica em corrente alternada [1].

De acordo com a norma IEC 60228, os condutores estão repartidos em quatro classes por ordem crescente de flexibilidade, sendo essas classes as seguintes:

- **Classe 1:** Condutores sólidos ou maciços;
- **Classe 2:** Condutores cableados;
- **Classe 5:** Condutores flexíveis;
- **Classe 6:** Condutores flexíveis com um nível de flexibilidade superior a classe 5.

2.1.2 - Camadas semicondutoras

As camadas semicondutoras dos cabos de AT e MT isolados são camadas finas de polímeros, geralmente da mesma composição base do material do isolamento; no entanto possuem uma determinada dopagem de material condutor (por exemplo carbono) [1].

A camada interna, denominada semicondutor interno, é aplicada sobre a alma condutora com ao objetivo de criar uma superfície equipotencial uniforme em torno deste. Para além de outras funções evita a concentração do campo elétrico em pontos específicos correspondentes às irregularidades da periferia da alma condutora.

No caso da camada exterior, denominada por semicondutor externo, esta é aplicada sobre o isolamento, tendo como principais funções facilitar a aplicação do ecrã metálico e criar as condições necessárias à regularização e orientação do campo elétrico, não danificando o isolamento seja do ponto de vista elétrico ou mecânico.

Normalmente, as duas camadas semicondutoras e a camada isolante (isolamento) são aplicadas por um processo de tripla extrusão simultânea de forma a garantir uma perfeita adesão entre as três camadas.

2.1.3 - Camada isolante

A camada isolante (isolamento¹) é constituída por compostos dielétricos sólidos, na maioria dos casos aplicados por tripla extrusão em simultâneo com as camadas semicondutoras [2].

Atualmente os materiais usados na camada isolante são isolantes sintéticos (também conhecidos por isolantes secos), sendo que no passado os cabos eram isolados com recurso a papel impregnado a óleo.

De forma genérica os isolantes sintéticos podem ser divididos em dois grandes grupos [1]:

- **Materiais Termoplásticos:** materiais em que a temperatura provoca, de uma maneira reversível, uma variação na plasticidade. Os materiais mais usuais desta família são o Policloreto de Vinilo (PVC) e o Polietileno (PE);
- **Elastómeros e Polímeros Reticuláveis:** estes tipos de materiais apresentam uma grande aptidão para a deformação. Após a extrusão necessitam de ser submetidos a um processo de vulcanização ou de reticulação com o propósito de estabelecer, de uma forma irreversível, ligações transversais entre as cadeias moleculares. Alguns exemplos deste tipo de materiais isolantes são o Polietileno Reticulado (PEX ou XLPE), Copolímeros de Etileno-Propílico (EPR e HEPR), Borracha de Silicone, etc.

Os materiais dielétricos anteriormente referidos apresentam diferentes comportamentos em função da temperatura, ditando a temperatura máxima de funcionamento dos cabos. De acordo com as normas IEC 60502-2 e IEC 60840, as temperaturas máximas admissíveis em regime normal de funcionamento encontram-se representadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Temperaturas máximas admissíveis para os diferentes materiais dielétricos.

Material Dielétrico	PVC	PE	HDPE	XLPE	EPR	HEPR
Temp. Máxima Funcionamento (°C)	70	70	80	90	90	90

¹ O termo “isolamento” refere-se à *performance* de um determinado isolante; é uma característica, melhor ou pior, de um material. Embora comumente utilizado, o seu uso é, na verdade, incorreto, devendo ser substituído pelo termo “isolação”, o qual se refere à camada isolante de um condutor isolado ou cabo. Atendendo ao uso generalizado do termo anterior, este será também utilizado no decorrer deste trabalho.

2.1.4 - Revestimentos metálicos

Estes componentes de revestimentos metálicos distinguem-se pela sua localização e função, existindo dois tipos de revestimentos: ecrãs metálicos e armaduras metálicas.

Ecrã metálico

O ecrã metálico é aplicado sobre a camada semicondutora externa e tem em vista a proteção elétrica, isto é, permite assegurar o escoamento das correntes capacitivas, bem como das correntes de curto-circuito (especialmente a componente homopolar da corrente de curto-circuito Fase-Terra). Este revestimento é ainda responsável pela proteção contra as perturbações eletromagnéticas no caso de cabos de telecomunicações, bem como das pessoas, em caso de perfuração do cabo por um corpo condutor exterior, já que este é colocado ao potencial da terra (admitindo que o ecrã está ligado à terra) [2].

Os materiais que se utilizam usualmente para este fim são o cobre, nu ou estanhado, ou alumínio e suas ligas. A utilização destes materiais em ecrãs metálicos pode ser realizada por [1]:

- Uma ou várias fitas, enroladas em hélice, de maneira a que nenhum espaço livre seja visível do exterior;
- Uma fita em alumínio ou cobre de reduzida espessura, colocada ao comprimento e revestida numa das faces com um produto destinado a assegurar a sua aderência à bainha exterior. Este produto é do mesmo tipo que o da bainha externa;
- Uma fita enrolada de cobre ou alumínio, eventualmente associada a uma fita de aço também enrolada, colocada a todo o comprimento do cabo;
- Uma malha, em fios de cobre ou alumínio, enrolada em hélice, eventualmente com os fios reunidos entre si com uma fita da mesma natureza, disposta igualmente em hélice. No caso de cabos flexíveis é utilizada uma trança de fios de pequeno diâmetro;
- Uma fita de cobre ou alumínio corrugado.

O ecrã metálico também permite criar uma superfície equipotencial e orientar, assim, as linhas de força do campo elétrico.

De acordo com a disposição do ecrã e a repartição das linhas de campo elétrico no isolamento, podem-se distinguir os cabos de campo radial e cabos de campo não radial [1] [2].

- Cabos de campo radial: caso dos cabos monopolares dotados de ecrã e dos cabos tripolares dotados de ecrãs individuais. Esta disposição de ecrãs individuais permite que no interior do isolante as linhas de força do campo elétrico apresentem sempre uma direção radial (cf. na imagem esquerda da Figura 2.5);
- Cabos de campo não radial: em que o ecrã é colocado, no caso de um cabo tripolar, sobre uma bainha de enchimento isolante que envolve o conjunto dos condutores (cf. na imagem direita da Figura 2.5). Esta disposição do ecrã metálico coletivo tem como consequência principal, do ponto de vista elétrico, o aparecimento de um campo elétrico no isolamento variável em amplitude e direção. Neste caso a componente tangencial do campo elétrico não é desprezável, o que ocasiona uma limitação na tensão de utilização devido à menor rigidez dielétrica do material isolante segundo aquela direção.

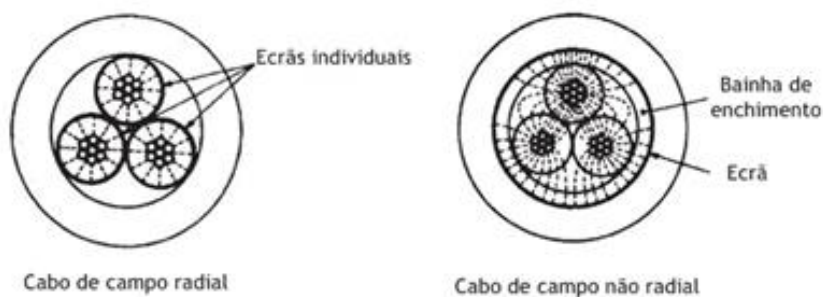


Figura 2.5 - Cabos de campo radial e não radial [2].

Armadura metálica

A armadura metálica tem como principal função assegurar a proteção mecânica do cabo, quando este é submetido a importantes esforços transversais (compressão ou choque) ou longitudinais (tração), quer durante a colocação quer ao longo da operação.

Pode, eventualmente ser utilizada com a função de ecrã metálico, desde que sejam tomadas algumas disposições no plano elétrico [1].

Os principais tipos de armaduras usadas em cabos multipolares são os seguintes [2]:

- Armadura em dupla fita de aço, aplicada helicoidalmente;
- Armaduras em fios de aço aplicados helicoidalmente;
- Armadura em trança de fios de aço, a usar em situações em que se requer maior flexibilidade.

No caso de cabos monopolares não são usadas armaduras em aço, já que as características magnéticas deste tipo de armadura desaconselhem o seu uso em corrente alternada, por haver uma apreciável redução da capacidade de transporte da canalização. Como alternativa são usadas armaduras de alumínio em dupla fita, aplicada helicoidalmente, outra hipótese será dispensar a armadura, é utilizar uma proteção mecânica exterior (por exemplo, um tubo).

2.1.5 - Revestimentos não metálicos

Os revestimentos não metálicos são essencialmente constituídos por dois tipos de revestimento [1]:

- **Bainha exterior:** tem a função de assegurar a proteção do cabo às influências externas, isto é, garantir a estanquidade à água e resistência a agentes nocivos, tais como substâncias corrosivas, agentes atmosféricos, etc;
- **Bainha interior:** esta bainha também é denominada bainha de enchimento, tem como principal função preencher os espaços vazios entre condutores (em geral em cabos tripolares) e dar ao conjunto uma determinada geometria, geralmente cilíndrica.

Os materiais mais usados nas bainhas são o Policloreto de Vinilo (PVC) e o Polietileno (PE).

2.1.6 - Bloqueio longitudinal à penetração de água

O bloqueio longitudinal à penetração de água, visa bloquear a progressão da água ao longo do cabo, quer na alma condutora ou no ecrã metálico, permitindo assim reduzir o risco de envelhecimento precoce do cabo em caso de perfuração do mesmo. Para tal, são utilizados materiais higroscópicos² nos componentes do cabo mais suscetíveis de envelhecimento como é o caso da alma condutora e do ecrã metálico [1].

Se a alma condutora for multifilar, este componente levará em cada camada um conjunto de fios hidroexpansivos. No caso do ecrã metálico este levará fitas hidroexpansivas, (em geral, com propriedades semicondutoras) sob e/ou sobre o ecrã.

² Propriedade que certos materiais possuem de absorver água.

2.2 - Aspectos Elétricos

Nesta secção são abordados alguns aspectos eléctricos referidos no decorrer do trabalho, visando uma melhor compreensão dos mesmos.

2.2.1 - Tensão estipulada dos cabos de AT e MT

Os cabos de energia são, normalmente concebidos para um determinado valor de tensão estipulada, em função do qual são definidas as condições para alguns ensaios. O valor de tensão estipulada, no caso dos cabos de AT e MT, é exprimido por um conjunto de três parâmetros, em kilovolt, sob a forma de $U_o/U (U_m)$ em que cada parâmetro representa [1] [3]:

- U_o – Tensão entre um condutor e um potencial de referência, que pode ser o ecrã metálico ou mesmo a terra (tensão simples);
- U – Tensão entre dois condutores de fase (tensão composta);
- U_m – Tensão do isolamento definida como sendo a tensão máxima que pode surgir entre fases da rede, em condições normais de exploração.

2.2.2 - Gradiente de potencial

O gradiente de potencial, também conhecido por *stress* eléctrico, é definido como sendo a relação entre a tensão aplicada ao isolamento e a sua espessura.

O gradiente de potencial varia ao longo do isolamento, no sentido radial, assumindo valores máximos no ponto de contacto com o condutor e o valor mínimo na superfície exterior do isolamento, como é possível observar na Figura 2.6. Quando o valor máximo do gradiente de potencial é ultrapassado, diz-se que o gradiente de potencial superou a rigidez dieléctrica do cabo, podendo ocorrer dessa forma a perfuração do isolamento. Essa perfuração pode ser potenciada pela existência de impurezas, vacúolos ou humidade [4].

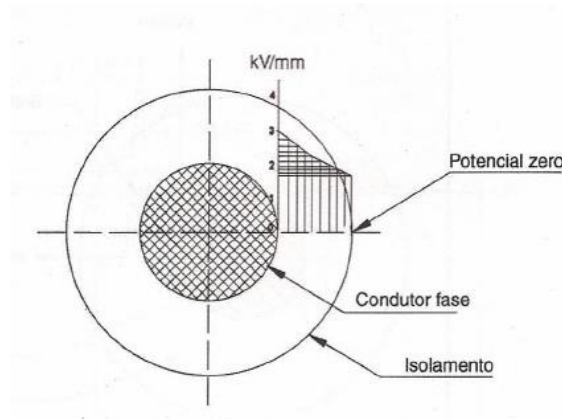


Figura 2.6 - Distribuição do Campo Elétrico no isolamento de um cabo [4].

Os valores dos gradientes de potencial, à superfície do condutor e à do isolamento, são obtidos pelas expressões (2.1) e (2.2), respetivamente, de acordo com a norma IEC 60840.

$$E_i = \frac{2U_0}{d_{ii} \ln\left(\frac{D_{io}}{d_{ii}}\right)} \quad (2.1)$$

$$E_0 = \frac{2U_0}{D_{io} \ln\left(\frac{D_{io}}{d_{ii}}\right)} \quad (2.2)$$

Em que:

E_i — Gradiente de potencial à superfície do condutor (kV/mm);

E_0 — Gradiente de potencial à superfície do isolamento (kV/mm);

U_0 — Tensão Simples (kV);

D_{io} — Diâmetro exterior nominal do isolamento (mm);

d_{ii} — Diâmetro interior declarado do isolamento (mm);

t_n — Espessura nominal do isolamento (mm);

$D_{io} = d_{ii} + 2t_n$.

O gradiente de potencial é uma das características mais importantes no dimensionamento de um cabo, uma vez que a aplicação de uma camada isolante com espessura desadequada poderá levar a problemas de funcionamento.

A determinação da espessura do isolamento dos cabos de MT é independente da secção transversal dos condutores. Isto faz com que se adote um gradiente máximo de projeto que satisfaça as mais severas condições de operação do cabo (a norma IEC 60502-2 especifica as espessuras nominais para os diferentes materiais isolantes). Por outro lado, para os cabos de

AT a espessura do isolamento é determinada em função da secção e da geometria do condutor [4].

2.2.3 - Fator de perdas dielétricas

O fator de perdas dielétricas também conhecido por $\tan \delta$ mede, essencialmente, o desfasamento δ (denominado ângulo de perdas) entre a corrente de fugas capacitiva (I_c) e a tensão (U), conforme representado na Figura 2.7. A componente capacitiva depende principalmente das características geométricas do cabo, enquanto a componente resistiva (I_r) é indicativa quer da presença de vacúolos no interior do isolamento, quer de contaminação ou humidade [5].

Num dielétrico perfeito a corrente capacitiva está rigorosamente em avanço de 90° em relação à tensão aplicada, uma vez que o dielétrico perfeito é livre de impurezas bem como de perdas dielétricas e o ângulo de perdas é nulo. No caso de um dielétrico não perfeito, dependendo do número de impurezas presentes no material dielétrico, o desfasamento é ligeiramente inferior a 90° , traduzindo-se por uma perda de energia que provoca o aquecimento do isolamento [1].

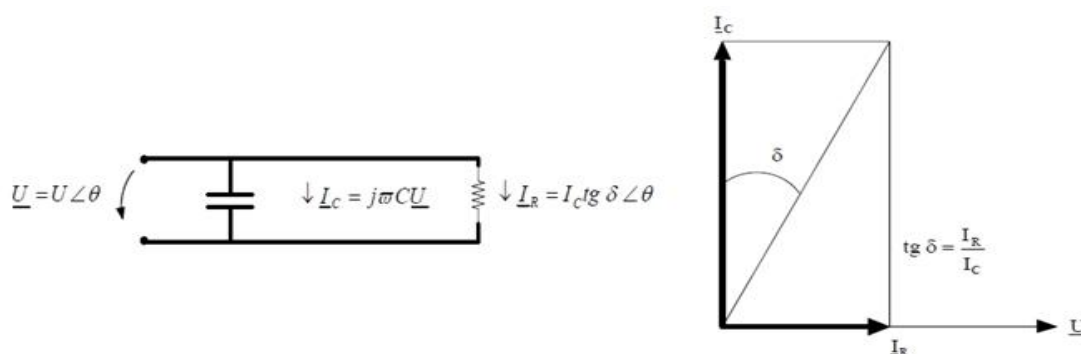


Figura 2.7 - Circuito equivalente de um condensador ideal e fator de perdas dielétrica [2].

2.2.4 - Capacidade

A capacidade entre dois condutores é determinada pelo quociente entre a quantidade de energia armazenada nos mesmos e a diferença de potencial aplicada. Este parâmetro varia com a geometria do cabo e os materiais utilizados na sua construção.

Um cabo constitui um sistema complexo de capacidades, designadas por capacidades parciais, as quais se localizam entre [1]:

- Os vários condutores;
- Em cada condutor e o elemento tomado como potencial de referência (ecrã metálico ou meio exterior).

De acordo com a norma IEC 60287-1-1, para cabos monopolares, a capacidade linear é dada pela expressão (2.3).

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \cdot \ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} 10^{-9} \quad (2.3)$$

Em que:

C – Capacidade linear (F/m);

ε – Permitividade relativa do isolamento;

D_i – Diâmetro externo do isolamento (excluindo o semicondutor externo) (mm);

d_c – Diâmetro do condutor (incluindo o semicondutor interno) (mm).

2.2.5 - Perdas dielétricas

De acordo com a norma IEC 60287-1-1, as perdas dielétricas no isolamento, por unidade de comprimento do cabo são dadas por:

$$W_d = \omega \times C \times U_0^2 \times \tan \delta \quad (2.4)$$

Em que:

W_d – Perdas no dielétrico do condutor (W/m);

ω – Frequência angular da rede ($2\pi f$) (rad/s);

C – Capacidade linear (F/m);

U_0 – Tensão Simples (V).

2.3 - Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados, os aspectos construtivos dos cabos isolados de AT e MT, sendo ainda abordados alguns aspectos de cariz elétrico. Este capítulo permite ao leitor uma contextualização e familiarização com os aspectos construtivos e elétricos dos cabos abordados nos capítulos seguintes.

Capítulo 3

Controlo da Qualidade

Neste capítulo são apresentados e analisados os vários tipos de ensaios realizados a cabos isolados de AT e MT, e que estão na base do Controlo da Qualidade. São ainda apresentados, os ensaios realizados em cada tipo de ensaio, com as devidas particularidades e especificações.

3.1 - Ensaio Laboratoriais de Controlo da Qualidade

Ao longo do processo de fabrico dos cabos isolados, desde a produção da alma condutora até a extrusão final da bainha exterior, a qualidade é criteriosamente controlada por forma a garantir que o produto final possui todas as características previamente estabelecidas. Nesse sentido, e com o objetivo de verificar as características elétricas, mecânicas e físico-químicas dos cabos, são realizados um conjunto de ensaios laboratoriais que seguem normas definidas e aceites internacionalmente. Atualmente existem dois padrões de normas de referência para os ensaios de cabo isolados: os definidos pela IEC- *International Electrotechnical Commission* (CEI- Comissão Eletrotécnica Internacional) e os definidos pelo IEEE- *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.

Os fabricantes de cabos isolados estão condicionados pelas exigências de qualidade dos seus clientes, Operadores de Redes de Distribuição e Transporte. Constatando que grande parte dos Operadores utiliza como critérios de qualidade dos cabos os ensaios das normas da IEC ou normas internas da própria empresa com uma forte base das normas da IEC, o estudo dos ensaios irá incidir somente nas normas da IEC.

Para realização de ensaios de cabos elétricos, a IEC possui várias normas, definidas de acordo com os diferentes níveis de tensão:

18 Controlo da Qualidade

- Média Tensão: IEC 60502-2;
- Alta Tensão: IEC 60840;
- Muita Alta Tensão: IEC 62067.

Uma vez, que este estudo visa o estudo de ensaios a cabos isolados de AT e MT, a norma IEC 62067 não será objeto de estudo.

De acordo com as normas IEC 60502-2 e IEC 60840, existem vários tipos de ensaios laboratoriais:

- **Ensaio de Rotina (*Routine Tests*)** – Ensaio realizado pelo fabricante sobre todos os comprimentos de cabo produzidos (em bobine), com a finalidade de verificar se todos os requisitos especificados são cumpridos;
- **Ensaio de Amostra (*Sample Tests*)** – Ensaio realizado pelo fabricante em amostras de cabo completo (em bobine) e sobre componentes retirados do cabo completo, com uma determinada amostragem, por forma a verificar o cumprimento dos requisitos especificados na fase de projeto do cabo;
- **Ensaio de Tipo (*Type Tests*)** – Ensaio realizado pelo fabricante com a finalidade de comprovar o desempenho de cabos ou sistemas de cabos (cabo mais acessórios) desenvolvidos em projeto, antes do fornecimento do produto ao mercado. Estes ensaios devem ser realizados de modo geral uma única vez para cada projeto de cabo, a menos que haja modificação do projeto do cabo que possa alterar o seu desempenho;
- **Ensaio de Pré-qualificação (*Prequalification Tests*)**³ – Ensaio realizado pelo fabricante antes do fornecimento do produto ao mercado. Este tipo de ensaio serve para demonstrar o desempenho adequado de um tipo de sistema de cabo (cabo mais acessórios) a longo prazo. Existe ainda uma subcategoria deste ensaio designada Extensão do Ensaio de Pré-qualificação (*Extension of Prequalification*);
- **Ensaio após Instalação (*Electrical Tests after Installation*)** – Ensaio destinados a demonstrar a integridade do cabo e os respetivos acessórios, após a instalação destes, ter sido concluída.

³ Este tipo de ensaio é referente só a norma IEC 60840, cabos de AT.

As normas IEC estipulam os ensaios que deverão ser realizados por fabricantes de cabos. Abordando para cada tipo de ensaio os respectivos ensaios a realizar, mais a frente serão abordados os respectivos ensaios.

De acordo com as características dos vários tipos de ensaios, estes podem ser realizados em todo o comprimento do cabo (em bobines) ou por amostra, podendo ainda ser classificados como:

- **Ensaio não destrutivo** — Este tipo de ensaio não danifica o cabo examinado, permitindo a sua utilização posteriormente (e.g. medição da resistência elétrica, medição da capacidade e medição da $\tan \delta$);
- **Ensaio destrutivo** — Este tipo de ensaio pode levar à destruição do cabo, impossibilitando a sua utilização posterior (e.g. ensaio de choque atmosférico, medição de descargas parciais).

3.2 - Condições Gerais de Ensaio

A realização dos ensaios laboratoriais requer a uniformização das condições de ensaio, independentemente do laboratório a usar, garantindo assim que os resultados obtidos com os ensaios sejam os mais fidedignos possíveis. Os ensaios laboratoriais especificados pelas normas IEC 60502-2 e IEC 60840 especificam as seguintes condições:

- Temperatura ambiente — A menos de outras especificações em ensaios particulares, estes são realizados a uma temperatura ambiente de $(20 \pm 15)^\circ\text{C}$;
- Frequência e forma de onda dos ensaios de tensão à frequência industrial — A frequência da tensão de ensaio estão compreendidas entre os 49 Hz e os 61 Hz;
- Forma de onda do ensaio ao choque atmosférico (ensaio de impulso atmosférico) — A onda de choque possui um tempo de frente compreendido entre $1 \mu\text{s}$ e $5 \mu\text{s}$ e um tempo de cauda compreendido entre $40 \mu\text{s}$ e $60 \mu\text{s}$.

3.3 - Especificações de Ensaio a Cabos de MT

De acordo com a norma IEC 60502-2 existem quatro tipos de ensaios anteriormente referidos. Assim sendo, e com intuito de demonstrar os ensaios existentes em cada tipo de ensaio, será feita uma abordagem sobre os vários ensaios existentes na norma. Contudo os ensaios após instalação não serão alvo de estudo uma vez que estes ensaios se encontram fora do âmbito do estudo a realizar.

3.3.1- Ensaios de Rotina

Os ensaios de rotina são realizados, normalmente, em cada comprimento de cabo fabricado (em bobine). Segundo a norma IEC 60502-2, os ensaios exigidos são:

- Medição da resistência elétrica;
- Medição de descargas parciais;
- Ensaio de tensão.

3.3.1.1 - Medição da resistência elétrica

A medição da resistência deve ser efetuada sobre todos os comprimentos totais de cabos produzidos, usualmente quando estes se encontram em bobines.

De acordo com a norma IEC 60502-2, a medição da resistência é realizada num local de ensaio onde a temperatura possa manter-se constante, pelo menos 12 horas antes da realização do ensaio. Quando houver dúvidas quanto à temperatura do cabo ser a mesma do local de ensaio, a resistência é medida depois de o cabo ter estado no local de ensaio durante 24 horas.

Os valores medidos (resistência e temperatura) são posteriormente corrigidos para a temperatura de 20°C e por km, de acordo com a fórmula e os fatores de temperatura indicados na norma IEC 60228:

$$R_{20} = R_t \times K_t \times \frac{1000}{L_c} \quad (3.1)$$

Em que:

R_{20} — Resistência do condutor a 20 °C (Ω/km);

R_t — Resistência do condutor medido (Ω);

K_t — Fator de correção da temperatura (ver Anexo A);

L_c — Comprimento do cabo (m).

De acordo com a norma IEC 60228, o valor da resistência obtido pela equação (3.1), com a devida correção de temperatura, deve ser inferior ao valor especificado na norma para as diversas classes⁴ de cabos.

⁴ A norma IEC 60228, define várias classes de cabos, tendo em conta aspetos construtivos.

3.3.1.2 - Medição de descargas parciais

A realização da medição de descarga parcial deve-se ao facto das descargas parciais serem fenómenos⁵ que podem levar à perfuração do cabo e consequentemente conduzir à sua falha. As descargas parciais podem ser classificadas em quatro tipos [6]:

- **Descargas internas:** ocorrem em espaços vazios (vacúolos) dentro do isolamento;
- **Descargas de superfície:** ocorrem no limite de diferentes materiais isolantes;
- **Descarga por efeito de coroa:** ocorrem em dielétricos gasosos na presença de campos elétricos não homogéneos;
- **Impacto contínuo de descargas parciais:** leva ao surgimento de um canal de descarga no isolamento (*treeing*, na terminologia inglesa).

A medição de descargas parciais deve ser realizada em conformidade com a norma IEC 60502-2, com uma sensibilidade de 10 pC (calibração do aparelho de medição). Para tal, aplica-se na alma condutora uma tensão alternada, aumentando gradualmente até atingir-se o valor de $2 U_0$, é mantendo-a durante 10 segundos, reduzindo-se de seguida o valor de tensão lentamente até obter-se o valor de $1,73 U_0$.

O cabo ensaiado estará em conformidade se não forem verificadas quaisquer descargas parciais que excedam a sensibilidade da medição a $1,73 U_0$.

3.3.1.3 - Ensaio de tensão

O ensaio de tensão, também conhecido por ensaio de rigidez dielétrica de acordo com a norma IEC 60502-2, deve ser realizado à temperatura ambiente utilizando uma tensão alternada à frequência industrial. O objetivo deste ensaio é aplicar, durante um determinado período de tempo, uma solicitação dielétrica superior à encontrada em serviço. Para cabos monopolares e tripolares com ecrã metálico individual, o ensaio de tensão deverá ter uma duração de 5 minutos, sendo a tensão aplicada entre a alma condutora e o ecrã metálico. No caso de cabos tripolares sem ecrã metálico individual mas com ecrã metálico coletivo, o ensaio de tensão deverá ter também uma duração de 5 minutos aplicando uma tensão em sequência entre cada condutor isolado e o ecrã metálico coletivo.

A tensão de ensaio à frequência industrial deve ser de $3,5 U_0$. Os valores para ensaio de tensão a aplicar a um cabo monopolar estão indicados na Tabela 3.1.

⁵ Fenómenos elétricos, radiação eletromagnética, luz, libertação de calor, ruído, libertação de gases, transformações químicas. No caso das descargas parciais em cabos isolados é o fenómeno elétrico, o usualmente considerado para caracterizar a severidade das descargas.

Tabela 3.1 - Tensões a aplicar no ensaio de tensão, segundo a IEC 60502-2.

Tensão Simples U_0 (kV)	3,6	6,0	8,7	12	18
Tensão de Ensaio $3,5 U_0$ (kV)	12,5	21	30,5	42	63

Em todos os casos, a tensão de ensaio deve ser aumentada de forma gradual até o valor especificado.

Por fim, como requisito para que o cabo seja validado, não poderá ocorrer a perfuração do isolamento no decurso deste ensaio.

3.3.2 - Ensaio de Amostra

Os fabricantes de cabos de acordo com a norma IEC 60502-2 devem possuir procedimentos internos de controlo de qualidade que estabeleçam a periodicidade destes ensaios. Segundo a norma este tipo de ensaio é realizado em amostras de cabo completo (em bobine), com uma amostragem de 10% do total de bobines produzidas.

Na ausência de tais procedimentos, para contratos em que o comprimento total seja superior a 2 km em cabos multipolares, ou 4 km em cabos monopolares, os ensaios devem ser realizados segundo um determinado número de amostras, de acordo com a Tabela 3.2.

Os ensaios de amostra podem ser divididos em duas categorias de ensaios, os não elétricos (grande parte de controlo dimensional) e os elétricos. Atendendo ao âmbito deste trabalho, apenas serão abordados os ensaios de caráter elétrico.

De acordo com a norma IEC 60502-2 só existe um ensaio de caráter elétrico, o Ensaio de Tensão (4 horas).

Tabela 3.2 - Número de amostras por comprimento, segundo a IEC 60502-2.

Comprimento de Cabo				Número de Amostras
Cabos Multipolares		Cabos Monopolares		
Acima (km)	Até e Inclusive (km)	Acima (km)	Até e Inclusive (km)	
2	10	4	20	1
10	20	20	40	2
20	30	40	60	3
...

3.3.2.1 - Ensaio de tensão (4 horas)

Este ensaio é aplicado somente aos cabos de tensão estipulada acima de 3,6/6 (7,2) kV. A amostra do cabo tem de ter pelo menos 5 m de comprimento.

O ensaio é realizado com uma tensão alternada à frequência industrial, sendo aumentada gradualmente até ao valor especificado e mantida durante 4 horas à temperatura ambiente, entre a alma condutora e o ecrã metálico. Essa tensão de ensaio deve ser de $4 U_0$. Os valores para o ensaio de tensão (4 horas) a aplicar a um cabo monopolar encontram-se indicados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Tensões a aplicar no ensaio de tensão 4h, segundo IEC 60502-2.

Tensão Simples U_0 (kV)	6	8,7	12	18
Tensão de Ensaio $4 U_0$ (kV)	24	35	48	72

Como requisito, para o cabo estar em conformidade com as suas características de isolamento, este não poderá apresentar perfuração no isolamento.

3.3.3 - Ensaios de Tipo

De acordo com a norma IEC 60502-2, estes ensaios⁶ são compostos por ensaios de âmbito elétrico e não elétrico. Estes ensaios são realizados num cabo amostra com um comprimento de 10 m a 15 m, e a um mesmo cabo de amostra é aplicada a seguinte sequência de ensaios de âmbito elétrico:

- Ensaio de enrolamento, seguido da medição de descargas parciais;
- Medição da $\tan \delta$ ⁷ (fator de perdas dielétricas);
- Ensaio de ciclos de aquecimento, seguido da medição de descargas parciais;
- Ensaio de choque atmosférico, seguido de um ensaio de tensão;
- Ensaio de tensão (4 horas).

Para além da sequência de ensaios acima referida, existe ainda o ensaio de medição da resistividade elétrica dos semicondutores.

⁶ Ensaios referentes a cabos isolados com ecrã metálico.

⁷ O Ensaio pode ser realizado com uma amostra diferente da utilizada dos outros ensaios, não sendo exigido para cabos com tensão estipulada inferior 6/10 (12) kV.

Os ensaios de âmbito não elétrico resumem-se essencialmente a medições de espessuras (bainhas exteriores, isolamento, condutores, etc) e a contagem de fios (presentes na alma condutora, ecrã metálico, etc). O ensaio de penetração de água, pelas suas características, sobressai-se, sendo-lhe dada particular atenção.

Para cabos tripolares, os ensaios ou medições devem ser realizados em todos os seus condutores.

3.3.3.1 - Ensaio de enrolamento

Este ensaio antecede o ensaio de descarga parcial e a amostra deve ser dobrada em torno de um cilindro de ensaio, completando pelo menos uma volta completa. O processo de desenrolamento é efetuado em sentido contrário da dobragem. Este ciclo de operação deve ser repetido três vezes.

O diâmetro do cilindro de ensaio deve seguir os seguintes pressupostos da IEC 60502-2:

- Cabos com revestimento metálico de chumbo ou fita metálica aplicada longitudinalmente:
 - $25(d+D) \pm 5\%$, para cabos monopolares;
 - $20(d+D) \pm 5\%$, para cabos tripolares.
- Outros cabos:
 - $20(d+D) \pm 5\%$, para cabos monopolares;
 - $15(d+D) \pm 5\%$, para cabos tripolares.

Em que:

D – Diâmetro externo efetivo do cabo de amostra (mm);

d – Diâmetro real da alma condutora (mm);

S – Secção transversal da alma condutora (mm²).

Se a alma condutora não for circular deve-se calcular o diâmetro (d) pela expressão (3.2).

$$d = 1,13\sqrt{S} \quad (3.2)$$

3.3.3.2 - Medição de descargas parciais

Este ensaio é realizado de acordo com a norma IEC 60502-2, e em conformidade com a norma IEC 60885-3 (tal como abordado na subsecção 3.3.1.2), tendo em atenção o nível de sensibilidade da calibração do aparelho de medida; neste caso a sensibilidade considerada para as descargas parciais terá que ser inferior ou igual a 5 pC.

3.3.3.3 - Medição da $\tan \delta$

A medição da $\tan \delta$ permite verificar a existência de perdas dielétricas nos cabos e baseia-se numa aproximação de um cabo por um condensador ideal, em que o material dielétrico está contido entre a alma condutora e o ecrã metálico. Contudo, e conforme descrito na subsecção 2.2.3, se por uma razão qualquer o isolamento ou os semicondutores não forem dielétricos perfeitos, o sistema (alma condutora mais ecrã metálico) deixa de ser um condensador ideal, pelo que se irão verificar perdas dielétricas, sendo desta forma possível obter informação sobre as condições do cabo.

A medição do fator de perdas dielétricas é efetuada em função da temperatura, de acordo com a norma IEC 60502-2. A amostra de cabo é aquecida inicialmente por um dos seguintes métodos: a amostra é colocada num tanque com líquido ou num forno, ou então é aquecida através da passagem de corrente pela alma condutora ou pelo ecrã metálico ou ainda por ambos, atingindo-se uma temperatura compreendida entre 5°C a 10°C acima do valor máximo da temperatura do cabo em funcionamento normal.

A $\tan \delta$ é medida com uma tensão alternada de pelo menos 2 kV, tendo em conta que os valores medidos não deverão ultrapassar os valores especificados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Valores máximos a considerados para a $\tan \delta$, para cada tipo de isolamento, segundo a IEC 60502-2.

Tipo de Isolamento		EPR/HEPR	XLPE
Temperatura Máxima de Operação	°C	90	90
$\tan \delta$	$\times 10^{-4}$	400	40

3.3.3.4 - Ensaio de ciclos de aquecimento

Este ensaio também é conhecido por **ensaio de envelhecimento acelerado com ciclos térmicos**, permitindo simular o funcionamento do cabo em regime permanente (apesar de não possuir carga).

De acordo com a norma IEC 60502-2, a amostra que foi submetida aos ensaios anteriores deve ser aquecida através da injeção de uma corrente na alma condutora, até que o condutor atinja uma temperatura constante de 5°C a 10°C acima da temperatura máxima do cabo em funcionamento normal. Para cabos multipolares, a corrente de aquecimento deve ser injetada em todos os condutores.

Cada ciclo de aquecimento tem, pelo menos, a duração de 8 horas, sendo que a temperatura do condutor deverá ser mantida dentro dos limites de temperatura acima referidos, pelo menos 2 horas em cada ciclo de aquecimento, seguido de um ciclo de arrefecimento à temperatura ambiente durante, pelo menos, 3 horas.

Este ensaio tem a duração de 20 ciclos completos (aquecimento e arrefecimento), sendo que após o último ciclo a amostra é sujeita a uma medição de descargas parciais (referida na subsecção 3.3.3.2).

3.3.3.5 - Ensaio de choque atmosférico

O ensaio ao choque atmosférico, também conhecido por impulso atmosférico, é realizado sobre uma amostra de cabo proveniente da sequência de ensaios realizados anteriormente (cf. na subsecção 3.3.3), segundo a norma IEC 60502-2.

A realização deste ensaio permite simular a ocorrência de dois tipos de sobretensões transitórias, as **sobretensões internas** (como sobretensões de manobra que surgem na abertura ou fecho de disjuntores ou seccionadores, por exemplo) e **sobretensões externas** (como as sobretensões atmosféricas que surgem quando ocorrem descargas atmosféricas) [7].

É portanto fundamental garantir que o cabo irá conseguir suportar as sobretensões, quer de origem interna ou externa, sem se danificar.

A simulação das sobretensões externas (atmosféricas) em laboratório de alta tensão é bastante complexa devido à ação do raio, cuja forma depende das características da descarga atmosférica. Contudo, convencionou-se representar esta sobretensão, nos ensaios laboratoriais, por uma onda de choque de tensão de forma biexponencial correspondendo a uma função do tipo descrita pela equação (3.3), em que τ_1 está associado à duração da cauda da onda e τ_2 à duração da frente da onda.

$$u(t) = U_0(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \quad (3.3)$$

A Figura 3.1 ilustra a forma de uma onda biexponencial, em que os parâmetros característicos essenciais de uma onda deste tipo são os seguintes [6] [7]:

- **Tensão de crista (U_{cr}):** Valor máximo de tensão atingido pela onda (kV);
- **Tempo de crista (T_{cr}):** Duração até ser atingida a tensão de crista (μs);
- **Tempo convencional da frente (T_1):** Esta duração convencional da frente é definida pela expressão $T_1 = 1,67(T_{90} - T_{30})$, em que T_{90} e T_{30} são respetivamente, os tempos decorridos desde a origem até ao instante em que a onda atinge 90% e 30% do valor de crista. Esta definição visa ultrapassar dificuldades surgidas com a exatidão do tempo de crista, uma vez que podem ocorrer oscilações parasitas;
- **Tempo de cauda (T_2):** Duração até ser atingido 50% do valor da tensão de crista (μs).

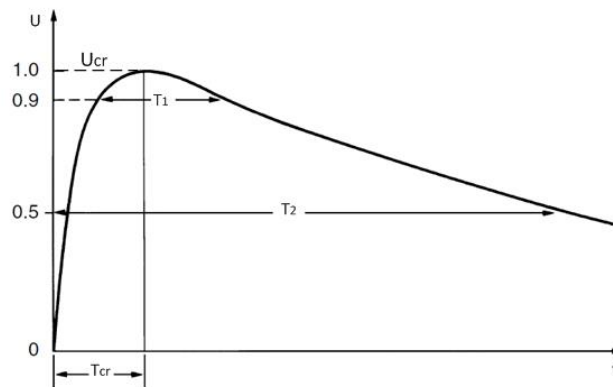


Figura 3.1 - Onda de choque típica de uma descarga atmosférica [6].

De acordo com a IEC 60502-2, este ensaio deverá ser realizado com uma amostra de cabo a uma temperatura compreendida entre 5°C e 10°C acima da temperatura máxima de funcionamento normal admissível do cabo.

A forma de onda de choque atmosférico típica está representada na Figura 3.1, e deverá ser aplicada de acordo com o procedimento da norma IEC 60230, com as seguintes características:

- Tempo de frente (T_1) compreendido entre $1\mu s$ e $5\mu s$;
- Tempo de cauda (T_2) com o valor de $50\mu s \pm 10\mu s$.

Segundo a norma IEC 60502-2, a tensão de ensaio (valor de pico) deve ser aplicada segundo a tensão estipulada dos cabos, definida na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Tensões (valor de pico) a aplicar no ensaio de choque atmosférico, segundo a IEC 60502-2.

Tensão Estipulada $U_0/U (U_m)$ (kV)	3,6/6 (7,2)	6,0/10 (12)	8,7/15 (17,5)	12/20 (24)	18/30 (36)
Tensão de Ensaio (valor de pico) (kV)	60	75	95	125	170

As ondas de choque devem incidir na alma condutora do cabo (no caso de cabos multipolares, em cada alma), aplicando dez ondas de choque positivas e dez negativas.

Após a realização do ensaio ao choque atmosférico, este é submetido ao ensaio de tensão (referido na subsecção 3.3.1.3) com uma tensão alternada à frequência industrial, mas com uma duração agora de 15 minutos. A tensão de ensaio aplicada foi especificada anteriormente na Tabela 3.1.

No decorrer dos ensaios não deverá ocorrer perfuração do isolamento.

3.3.3.6 - Ensaio de tensão (4 horas)

Por fim, este ensaio é realizado conforme foi mencionada na subsecção 3.3.2.1, com a ressalva de que a amostra de ensaio não possui um comprimento de 5 m, mais sim um comprimento compreendido entre 10 a 15 metros.

3.3.3.7 - Medição da resistividade elétrica dos semicondutores

A medição de resistividade elétrica dos semicondutores é efetuada quer no semicondutor interno (aplicado sobre a alma condutora), quer no externo (sobre o isolamento). De acordo com a norma IEC 60502-2, a resistividade deve ser determinada por meio da medição de dois provetes retirados de uma amostra de cabo. As medições dos dois provetes devem ser efetuadas à temperatura máxima admissível de funcionamento do cabo, com uma tolerância de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

A resistividade elétrica dos semicondutores estará em conformidade se a resistividade dos provetes (com e sem o teste de envelhecimento) não exceder os seguintes valores:

- Semicondutor interno: 1000 $\Omega\cdot\text{m}$;
- Semicondutor externo: 500 $\Omega\cdot\text{m}$.

3.3.3.8 - Ensaio de penetração de água

De acordo com a norma IEC 60502-2 este ensaio é realizado para projetos de cabos em que o fabricante inclui fitas hidroexpansivas para evitar a penetração de água longitudinal.

O ensaio é projetado para atender aos requisitos de cabos enterrados em solos, e aplicável aos seguintes projetos de cabos:

- Inclusão de fitas hidroexpansivas para evitar a penetração de água longitudinal na região do ecrã metálico;
- Inclusão de fitas hidroexpansivas para evitar a penetração de água longitudinal ao longo da alma condutora.

Este ensaio é realizado com uma amostra de cabo de pelo menos 6 m de comprimento, sendo a amostra previamente submetida ao ensaio de enrolamento. Após a realização do ensaio, uma nova amostra, com 3 m de comprimento, é retirada da amostra inicial de 6 m. No centro da amostra de 3 m de comprimento deverá ser cortado um anel com 50 mm de largura, deixando somente a alma condutora à vista, sendo colocado sobre esse anel um aparelho responsável pela inserção da água no cabo; este aparelho deverá ficar colocado a 1 m de altura em relação ao centro da alma condutora.

A amostra depois da colocação do aparelho deverá ser submetida a 10 ciclos de aquecimento, pela passagem de uma corrente na alma condutora, em que a temperatura da alma condutora deverá estar compreendida entre 5°C a 10°C acima da temperatura máxima admissível do cabo. Cada ciclo de aquecimento é composto por 8 horas de duração. A temperatura do condutor deve ser mantida pelo menos 2 horas dentro dos limites de temperatura acima referido e cada ciclo de aquecimento deverá ser seguido por pelo menos 3 horas de arrefecimento à temperatura ambiente. O cabo estará em conformidade se ao fim do ensaio não existir água nas extremidades da amostra.

3.4 - Especificações de Ensaio a Cabos de AT

De acordo com a norma IEC 60840, existem cinco tipos de ensaios anteriormente referidos, para cabos de AT. Assim sendo e com intuito de demonstrar os ensaios existentes em cada tipo de ensaio, será feita uma abordagem sobre os vários ensaios existentes na norma, permitindo assim verificar as alterações existentes nos ensaios, em relação aos dos cabos de MT. Contudo o ensaio após instalação, mais uma vez não será alvo do estudo.

3.4.1- Ensaio de Rotina

Os ensaios de rotina devem ser realizados em cada comprimento de cabo fabricado (em bobine) e compreendem os seguintes ensaios:

- Medição de descargas parciais;
- Ensaio de tensão;
- Ensaio de rigidez dielétrica de bainhas exteriores.

3.4.1.1 - Medição de descargas parciais

A medição de descargas parciais deve ser realizada em conformidade com a norma IEC 60885-3, com uma sensibilidade de 10 pC (calibração do aparelho de medição).

De acordo com a norma IEC 60840, a tensão de ensaio deverá ser aumentada gradualmente até atingir-se o valor de $1,75 U_0$, devendo ser mantida com uma duração de 10 segundos, sendo reduzida lentamente de seguida para um valor de $1,5 U_0$. Os valores para o ensaio das descargas parciais a aplicar a um cabo monopolar encontram-se indicados na Tabela 3.6.

Após a realização do ensaio, o cabo ensaiado estará em conformidade se não se verificarem quaisquer descargas parciais que excedam a sensibilidade de medição a $1,5 U_0$.

Tabela 3.6 - Tensões para a medição de descargas parciais com base da U_0 , segundo IEC 60840.

Tensão Composta U (kV)	45 a 47	60 a 69	110 a 115	132 a 138	150 a 161
Tensão de Isolamento U_m (kV)	52	72,5	123	145	170
Tensão Simples U_0 (kV)	26	36	64	76	87
Tensão de Descarga Parcial $1,5 U_0$ (kV)	39	54	96	114	131

3.4.1.2 - Ensaio de tensão

Este ensaio é também conhecido por ensaio de rigidez dielétrica, de acordo com a norma IEC 60840, é realizado à temperatura ambiente com uma tensão alternada à frequência industrial.

O objetivo deste ensaio é aplicar ao cabo uma solicitação dielétrica superior à encontrada em serviço normal, através da aplicação de uma tensão de ensaio entre a alma condutora e o ecrã metálico, durante um determinado período de tempo. A tensão de ensaio deve ser aumentada gradualmente para o valor de $2,5 U_0$ e os valores de referência de cabos monopolares estão representados na Tabela 3.7. Após atingido o valor de tensão de ensaio, esta deverá ser mantida por um período de 30 minutos.

Tabela 3.7 - Tensões de referência para o ensaio de tensão, segundo IEC 60840.

Tensão Composta U (kV)	45 a 47	60 a 69	110 a 115	132 a 138	150 a 161
Tensão de Isolamento U_m (kV)	52	72,5	123	145	170
Tensão Simples U_0 (kV)	26	36	64	76	87
Tensão de Ensaio $2,5 U_0$ (kV)	65	90	160	190	218

Por fim, como requisito para que o cabo seja validado, não poderá ocorrer a perfuração do isolamento no decurso do ensaio.

3.4.1.3 - Ensaio de rigidez dielétrica de bainhas exteriores

No ensaio rigidez dielétrica de bainhas exteriores, e de acordo com a norma IEC 60229 que rege este ensaio, deverá ser aplicada uma tensão em corrente contínua de 8 kV, por cada milímetro de espessura da bainha exterior, não devendo exceder uma tensão máxima de 25 kV. A duração da tensão aplicada entre o ecrã metálico e a bainha exterior do cabo deverá ser de 1 minuto.

Após a realização do ensaio, o cabo estará em conformidade se não ocorrer perfuração da bainha exterior.

3.4.2 - Ensaio de Amostra

De acordo com a norma IEC 60840, este tipo de ensaio é realizado em amostras de cabo completo (em bobine) ou em amostras, dependendo do ensaio a realizar, com uma amostragem de 10% do total de bobines produzidas.

Os ensaios de amostra têm duas vertentes, uma elétrica e outra não elétrica, esta última associada em geral ao controlo dimensional do cabo. No que diz respeito aos ensaios de cariz elétrico, são realizados os seguintes ensaios:

- Medição da resistência elétrica;
- Medição da capacidade;
- Ensaio de choque atmosférico.

Já nos ensaios de cariz não elétrico, destaca-se o ensaio de penetração de água, uma vez que os restantes ensaios são de controlo dimensional (e.g. medição de espessuras, contagem fios da alma condutora).

Contudo no caso do ensaio de choque atmosférico e do ensaio de penetração de água, a frequência destes ensaios está dependente do procedimento de controlo de qualidade estabelecido entre o fabricante e o cliente. Na ausência de tal procedimento, os ensaios devem ser realizados para contratos com um comprimento de cabo superior a 20 km.

3.4.2.1 - Medição da resistência elétrica

De acordo com a norma IEC 60840, a medição da resistência e do ecrã metálico é realizada em amostragem de cabo completo (bobine).

Esta medição de resistência elétrica e do ecrã metálico é realizada num local de ensaio a uma temperatura razoavelmente constante e mantida durante pelo menos 12 horas antes da realização do ensaio. Se houver dúvidas quanto à temperatura do cabo ser igual à do local do ensaio, a medição é efetuada depois do cabo ter estado no local de ensaio durante 24 horas. Os valores obtidos deverão ser corrigidos para a temperatura de 20°C e por km de

comprimento de acordo com a expressão (3.1) e fatores indicados na norma IEC 60228 (cf. subsecção 3.3.1.1).

3.4.2.2 - Medição da capacidade

De acordo com a norma IEC 60840 a capacidade deve ser medida entra a alma condutora e a ecrã metálico à temperatura ambiente. Uma vez obtido o valor da capacidade, este deve ser corrigido para 1 km de comprimento, não devendo exceder o seu valor nominal declarado pelo fabricante em mais de 8%.

3.4.2.3 - Ensaio de choque atmosférico

De acordo com a norma IEC 60840, o ensaio de choque atmosférico só é necessário para cabos que apresentem um gradiente de potencial (também designado por stress elétrico) à superfície do condutor superior a 8 (kV/mm).

O ensaio deverá ser realizado uma amostra de cabo pelo menos com 10 m de comprimento, a uma temperatura compreendida entre 5°C a 10°C acima da temperatura máxima do funcionamento normal do cabo. De forma a atingir a temperatura pretendida, o condutor deve ser aquecido por uma passagem de corrente, até que atinja a temperatura desejada.

A forma de onda de choque atmosférico deverá ser aplicada de acordo com o procedimento da norma IEC 60230, referidos anteriormente na subsecção 3.3.3.5.

O cabo deverá suportar dez ondas de choque positivas e dez ondas de choque negativas, com um valor de tensão indicado na Tabela 3.8, sem que ocorram falhas (perfurações do isolamento).

Tabela 3.8 - Tensão usada no ensaio de choque atmosférico, segundo IEC 60840.

Tensão Composta <i>U</i> (kV)	45 a 47	60 a 69	110 a 115	132 a 138	150 a 161
Tensão Simples <i>U₀</i> (kV)	26	36	64	76	87
Tensão de Ensaio (kV)	250	325	550	650	750

3.4.2.4 - Ensaio de penetração de água

O ensaio de penetração de água é realizado conforme o exposto na subsecção 3.3.3.8, para cabos de MT. Contudo a norma IEC 60840 impõe algumas diferenças na parte operacional para os cabos de AT: a amostra deve ter pelo menos 6 m de comprimento em vez dos 3 m

mencionados nos cabos de MT, enquanto o período de arrefecimento deverá ser de pelo menos 16 horas à temperatura ambiente, em detrimento de um período de 3 horas.

3.4.3 - Ensaio de Tipo

De acordo com a norma IEC 60840, os ensaios de tipo (qualificação) podem ser realizados em cabos ou em sistemas de cabos (cabos mais acessórios). Tendo em conta esta situação, a abordagem incidirá em sistemas de cabos, uma vez que os ensaios realizados a cabos são praticamente iguais. Contudo será feita a devida nota de atenção para as pequenas alterações existentes.

Estes ensaios devem ser realizados por uma ou mais amostras de cabo, dependendo do número de acessórios envolvidos, em pelo menos 10 m de comprimento (acessórios não incluídos). O comprimento mínimo de amostra entre acessórios deve ser de 5 m.

Tendo em contas as considerações acima referidas, estes ensaios de âmbito elétrico são realizados com a mesma amostra de cabo, na seguinte sequência de ensaios:

- Ensaio de enrolamento, seguido da medição de descargas parciais;
- Medição da $\tan \delta$;
- Ensaio de ciclos de aquecimento, seguido da medição de descargas parciais;
- Ensaio de choque atmosférico, seguido de um ensaio de tensão.

Por último é efetuada a medição da resistividade elétrica dos semicondutores, de acordo com o procedimento anteriormente mencionado para os cabos de MT (cf. subsecção 3.3.3.7).

Já nos ensaios de caráter não elétrico destaca-se mais uma vez o ensaio de penetração de água, referido nos ensaios de amostra (ver 3.4.2.4).

De seguida são apresentadas as especificações dos ensaios, seguindo a sequência de ensaios acima mencionada.

3.4.3.1 - Ensaio de enrolamento

Este ensaio pode ser considerado como um ensaio preparatório para a realização dos ensaios elétricos posteriores. De acordo com a norma IEC 60840, a amostra deve ser dobrada em torno de um cilindro de ensaio (por exemplo, o centro de um tambor), à temperatura ambiente, completando pelo menos uma volta completa. O processo de desenrolamento é efetuado em sentido contrário ao da dobragem. O ciclo de dobragem e de desenrolamento deverá ser repetido três vezes no total.

O diâmetro do cilindro de ensaio deve seguir os seguintes pressupostos na norma:

- Cabos com revestimento metálico de alumínio simples:

- $36(d+D)+5\%$, para cabos monopolares;
- $25(d+D)+5\%$, para cabos tripolares.
- Cabos com revestimento metálico de chumbo, ligas de chumbo ou fita metálica aplicada longitudinalmente:
 - $25(d+D)+5\%$, para cabos monopolares;
 - $20(d+D)+5\%$, para cabos tripolares.
- Outros cabos:
 - $20(d+D)+5\%$, para cabos monopolares;
 - $15(d+D)+5\%$, para cabos tripolares.

Em que:

D – Diâmetro externo efetivo do cabo de amostra (mm);

d – Diâmetro real da alma condutora (mm).

Nota: A tolerância negativa (dos 5%) não é especificada, ficando a critério dos fabricantes a sua utilização para a realização dos ensaios.

3.4.3.2 - Medição de descargas parciais

Segundo a norma IEC 60840, o ensaio é realizado em duas situações distintas: à temperatura ambiente e a uma temperatura acima da sua temperatura de funcionamento.

A aplicação da tensão de teste neste ensaio segue o procedimento anteriormente descrito na subsecção 3.4.1.1. Contudo o nível de sensibilidade (calibração do aparelho de medição) mínimo é diferente, devendo ser de 5 pC segundo a norma IEC 60885-3.

Por fim, no que diz respeito ao ensaio a uma temperatura acima da sua temperatura de funcionamento, o sistema de cabos (cabos mais acessórios) deve ser aquecido através da passagem de corrente no condutor até atingir uma temperatura de 5°C a 10°C acima do seu funcionamento normal, e deverá ser mantido dentro destes limites de temperatura durante pelo menos 2 horas.

Após a realização do ensaio, o cabo ensaiado estará em conformidade se não se verificarem descargas parciais superiores ao nível de sensibilidade a $1,5 U_0$. Importa salientar que para ensaios realizados apenas a cabos, a temperatura utilizada para efetuar a medição das descargas parciais deverá ser a temperatura ambiente.

3.4.3.3 - Medição da $\tan \delta$

A medição da $\tan \delta$ também é conhecido como ensaio de fator de perdas dielétricas, tendo sido apresentado na subsecção 3.3.3.3 para os cabos isolados de MT, mede essencialmente o desfasamento entre a tensão (U) e a corrente capacitiva (I_c), verificando desta forma a existência de perdas dielétricas.

De acordo com a norma IEC 60840, a amostra de cabo deve ser aquecida apenas pela passagem de corrente na alma condutora, e a temperatura deve estar compreendida entre 5°C a 10°C acima da temperatura máxima admissível em funcionamento normal. Para realizar a medição da $\tan \delta$ é aplicada uma tensão de frequência industrial de U_0 (cf. Tabela 3.9), estando a amostra de cabo à temperatura anteriormente referida.

Tabela 3.9 - Tensão aplicada no ensaio $\tan \delta$, segundo IEC 60840.

Tensão Composta U (kV)	45 a 47	60 a 69	110 a 115	132 a 138	150 a 161
Tensão de Isolamento U_m (kV)	52	72,5	123	145	170
Tensão de Ensaio U_0 (kV)	26	36	64	76	87

A validade dos ensaios realizados aos cabos é verificada se os valores medidos da $\tan \delta$ não ultrapassarem os valores especificados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Valores máximos admissíveis da $\tan \delta$, segundo IEC 60840.

Tipo de Isolamento		PE	HDPE	EPR/ HEPR	XLPE
$\tan \delta$	$\times 10^{-4}$	10	10	50	10 *

* Para cabos fabricados com um composto que contém aditivos especiais de XLPE, a $\tan \delta$ máxima será de 50×10^{-4}

3.4.3.4 - Ensaio de ciclos de aquecimento

O ensaio de ciclos de aquecimento, também designado por **ensaio de envelhecimento acelerado com ciclos térmicos**, permite simular o funcionamento do cabo em regime permanente (sem possuir carga), e antecede a medição de descargas parciais referida anteriormente na subsecção 3.4.3.2.

De acordo com a norma IEC 60840, a amostra de cabo deve apresentar uma curva em formato de “U” com um diâmetro conforme especificado na subsecção 3.4.3.1. Após a

colocação da amostra em formato de “U”, esta deve ser aquecida apenas pela passagem de uma corrente na alma condutora, até que este atinga uma temperatura constante compreendida entre 5°C e 10°C acima da temperatura normal de funcionamento do cabo. Se por razões de ordem prática a temperatura de ensaio não poder ser alcançada, pode aplicar-se um isolamento térmico.

Cada ciclo de aquecimento possui uma duração mínima de 8 horas. A temperatura do condutor deve ser mantida dentro dos limites da temperatura acima referidos durante pelo menos 2 horas em cada ciclo de aquecimento, seguido de um ciclo de arrefecimento à temperatura ambiente com uma duração mínima de 16 horas.

Os ciclos de aquecimento e de arrefecimento acima referidos devem ter uma duração de 20 ciclos completos.

Durante a realização de todo o período de ensaio, uma tensão de $2 U_0$ deverá ser aplicada à amostra, conforme representado na Tabela 3.11 (cabos monopolares).

Tabela 3.11 - Valor da tensão de teste aplicada ao ensaio de ciclos de aquecimento, segundo IEC 60840.

Tensão Composta U (kV)	45 a 47	60 a 69	110 a 115	132 a 138	150 a 161
Tensão de Isolamento U_m (kV)	52	72,5	123	145	170
Tensão Simples U_0 (kV)	26	36	64	76	87
Tensão de Ensaio $2 U_0$ (kV)	52	72	128	152	174

3.4.3.5 - Ensaio de choque atmosférico

O ensaio de choque atmosférico já foi referido anteriormente no ensaio de amostra na subsecção 3.4.2.3. Contudo, o ensaio de choque atmosférico no contexto do ensaio tipo, sofre algumas alterações, sendo realizado dentro de uma sequência de ensaios e para todos os tipos de cabos.

Segundo a norma IEC 60840, o sistema de cabos (cabos mais acessórios) deverá suportar dez ondas de choque positivas e dez ondas de choque negativas, para um valor de tensão indicado anteriormente na Tabela 3.8, sem que haja perfuração do isolamento ou uma descarga disruptiva⁸.

⁸ Passagem abrupta de corrente no meio isolante, quando este perde as suas propriedades de isolamento.

3.4.3.6 - Ensaio de tensão

De acordo com a norma IEC 60840, o ensaio de tensão (em ensaios tipos) realiza-se depois do ensaio de choque atmosférico. Este ensaio de tensão já foi descrito anteriormente na subsecção 3.4.1.2. Porém o ensaio de tensão no contexto do ensaio tipo tem algumas alterações: a tensão à frequência industrial aplicada (tensão de ensaio) deve ser aumentada gradualmente para o valor de $2,5 U_0$ (cf. Tabela 3.7) e, uma vez atingido esse valor, deverá ser mantida por um período de 15 minutos. O ensaio pode ser realizado durante o período de arrefecimento ou à temperatura ambiente, após a realização do ensaio de choque atmosférico.

Para que o sistema de cabos (cabos mais acessórios) seja validado, não poderão ocorrer falhas de isolamento.

3.4.4 - Ensaio de Pré-Qualificação

Os ensaios de pré-qualificação são realizados de acordo com a norma IEC 60840, para sistemas de cabos (cabo mais acessórios) que apresentem um gradiente de potencial à superfície do condutor superior a 8 (kV/mm) e/ou um gradiente de potencial à superfície do isolamento superior a 4 (kV/mm).

O ensaio de pré-qualificação deve ser realizado num sistema de cabos constituído por um cabo com um comprimento mínimo de 20 metros livre de quaisquer acessórios. O sistema deve ainda incluir pelo menos um acessório de cada tipo (terminais e uniões), em que o comprimento mínimo de cabo entre os acessórios deverá ser de 10 metros.

A sequência de ensaios realizados por este tipo de ensaio, segundo a IEC 60840, será a seguinte:

- Ensaio de ciclos de aquecimento;
- Ensaio de choque atmosférico.

Antes da realização dos ensaios acima mencionados, terá que se proceder à montagem do sistema de cabos e acessórios, consoante as instruções especificadas pelos fabricantes. O ensaio pode ser realizado num laboratório (em geral em laboratórios exteriores devido aos comprimentos dos cabos), não havendo necessidade de existir uma configuração que simule as condições reais de montagem.

Se um sistema de cabos for concebido para ser utilizado em instalações rígidas e flexíveis, uma união deve ser instalada numa configuração flexível e uma outra numa configuração rígida, de acordo com a Figura 3.2. Se a união for concebida para ser empregue apenas em instalações rígidas, a união deve ser instalada de uma forma rigidamente fixa em ambos os lados. De forma análoga, se a união for concebida apenas para instalações flexíveis, esta deve ser instalada numa configuração flexível em ambos os lados.

O cabo que fica entre as duas uniões (U1) deve ser dobrado em forma de “U” com um diâmetro especificado na subsecção 3.4.3.1.

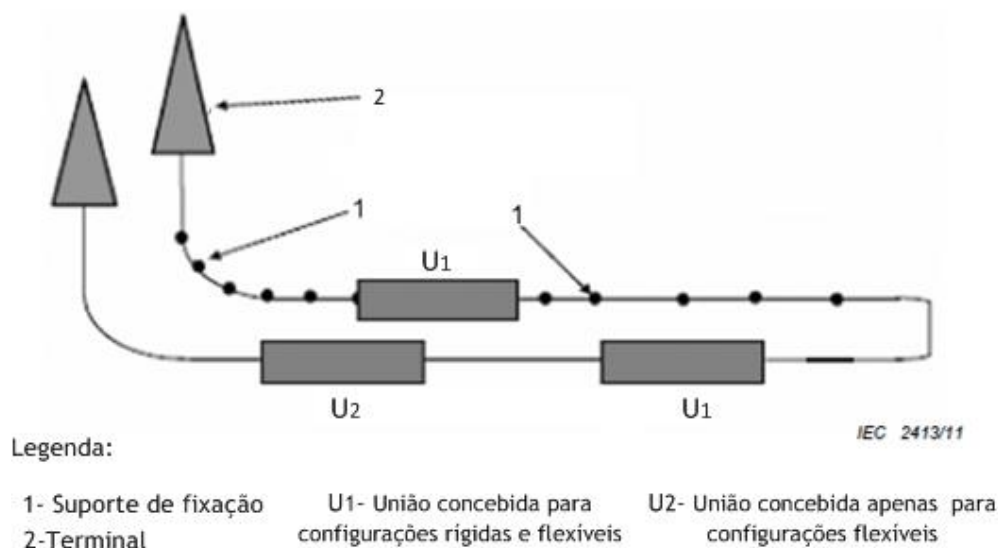


Figura 3.2 - Exemplo de disposição para o ensaio de pré-qualificação [8].

3.4.4.1 - Ensaio de ciclos de aquecimento

De acordo com a norma IEC 60840, o sistema de cabos deverá ser aquecido apenas pela passagem de corrente na alma condutora (o ponto de injeção da corrente deverá ser afastada dos acessórios), até que o sistema de cabos (cabo e acessórios) atinge uma temperatura compreendida entre 0°C e 5°C acima da temperatura máxima do seu funcionamento normal.

O aquecimento deverá ser aplicado pelo menos 8 horas e a temperatura deve ser mantida no condutor dentro dos limites de temperatura anteriormente referidos acima durante, pelo menos, 2 horas de cada período de aquecimento. Após o aquecimento segue-se um período de arrefecimento do condutor, de pelo menos 16 horas à temperatura ambiente. Mais uma vez, como já foi referido anteriormente para este ensaio de cabos isolados da AT, se por razões de ordem prática a temperatura de ensaio não puder ser alcançada, pode aplicar-se um isolamento térmico adicional.

O ciclo de aquecimento e de arrefecimento deve ser realizado 180 vezes. Durante a totalidade do período do ensaio, é aplicada ao conjunto uma tensão de $1,7 U_0$.

Para que o sistema de cabos testado seja validado, não deverá ocorrer a perfuração do isolamento e quebras entre o cabo e os seus acessórios.

A norma IEC 60840 sugere ainda que se efetue a medição das descargas parciais, com o intuito de fornecer um aviso prévio da existência de alguma degradação entre cabo e acessórios, permitindo assim a possibilidade de reparação antes que ocorra uma falha durante os ensaios. Também em alguns ciclos onde o tempo de aquecimento e de arrefecimento da

temperatura não atendem plenamente os requisitos de temperatura, são permitidos no máximo dez situações desse género.

3.4.4.2 - Ensaio de choque atmosférico

De acordo com a norma IEC 60840, este ensaio deve ser realizado em uma ou mais amostras de cabo com os respetivos acessórios, retiradas do sistema de cabos do ensaio de ciclos de aquecimento referido na subsecção 3.4.4.1, tendo essas amostras um comprimento mínimo útil de 10 m. Em alternativa, o ensaio pode ser realizado sobre todo o sistema de cabos usado no ensaio de ciclos de aquecimento (cf. subsecção 3.4.4.1).

Em ambas as situações, para as amostras ou sistemas de cabos, a temperatura do cabo para o ensaio deve estar compreendida entre 0°C a 5°C acima da temperatura máxima admissível do cabo em funcionamento normal. A temperatura deve ser mantida dentro dos limites indicados durante pelo menos 2 horas. O processo de aquecimento do cabo é o mesmo que foi referido no ensaio de ciclos de aquecimento (cf. subsecção 3.4.4.1).

Por fim, a forma de onda deve ser aplicada de acordo com a norma IEC 60230, assim como o valor da tensão de ensaio aplicada, segundo a norma IEC 60840, referidas anteriormente na subsecção 3.4.2.3.

3.4.4.3 - Extensão do ensaio de pré-qualificação

A extensão pré-qualificação é uma subcategoria do ensaio de pré-qualificação, consistindo basicamente na pré-qualificação de um sistema (cabo mais acessórios) já qualificado com uma nova inclusão de um ou mais acessório ainda não qualificados.

De acordo com a norma IEC 60840, o comprimento mínimo de cabo entre os acessórios deverá ser de 5 m, tendo o cabo um comprimento mínimo total de 20 m, para os ensaios. A montagem dos cabos e acessórios deverá seguir as especificações fornecidas pelo fabricante.

Se a pré-qualificação do sistema de cabos mais os novos acessórios for alargada para o uso quer em instalações rígidas quer flexíveis, uma união deve ser instalada na configuração flexível e uma outra na configuração rígida, conforme representado na Figura 3.3.

O cabo a ser ensaiado deverá apresentar uma curva na forma de “U” (ver Figura 3.3) com um diâmetro especificado na subsecção 3.4.3.1.

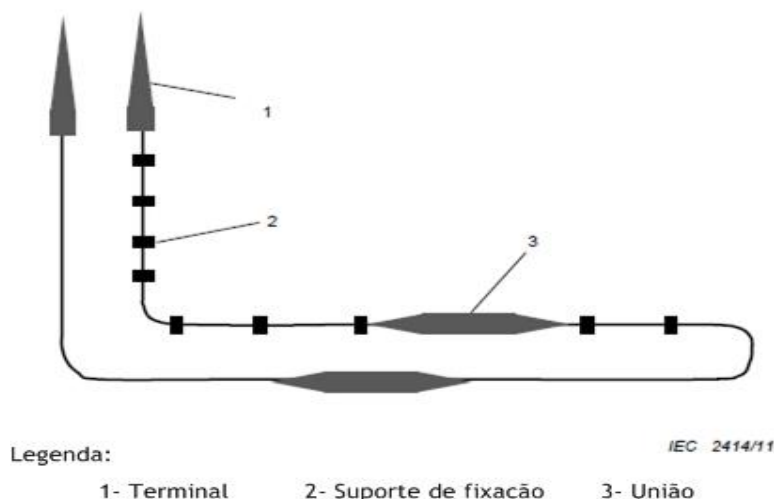


Figura 3.3 - Exemplo da disposição de um sistema pré-qualificado com um outro conjunto não pré-qualificado [8].

A sequência de ensaios realizados para esta subcategoria da pré-qualificação, segundo a norma IEC 60840 é a seguinte:

- Ensaio de enrolamento (cf. subsecção 3.4.3.1), seguido da instalação dos acessórios que fazem parte dos ensaios para a extensão da pré-qualificação;
- Medição de descargas parciais (cf. subsecção 3.4.3.2);
- Ensaio de ciclos de aquecimento sem tensão⁹ (cf. subsecção 3.4.3.4);
- Medição da $\tan \delta$ (cf. subsecção 3.4.3.3);
- Ensaio de ciclos de aquecimento (cf. subsecção 3.4.3.4);
- Medição de descargas parciais (cf. subsecção 3.4.3.2);
- Ensaio de choque atmosférico, seguindo do ensaio de tensão (cf. subsecção 3.4.3.5 e subsecção 3.4.3.6);
- Medição da resistividade elétrica dos semicondutores (cf. subsecção 3.3.3.7).

⁹ Ensaio realizado igual a subsecção referida, com a exceção do uso de tensão durante todo o período da realização do ensaio, assim como a redução do número de ciclos de aquecimento e arrefecimento para 60 ciclos.

3.5 - Resumo

Neste capítulo foram apresentados os ensaios laboratoriais de controlo da qualidade, especificados nas normas da IEC. Desta forma, é possível compreender os ensaios realizados nos diversos tipos de ensaios existentes nas normas estudadas (IEC 60502-2 e IEC 60840), permitindo assim compreender todo o procedimento e normalização aplicável pelas mesmas. Foi ainda possível verificar as diferenças que as duas normas possuem, quer para cabos isolados de MT e AT.

Contudo, o estudo das normas não permite um conhecimento profundo dos procedimentos para a realização dos vários ensaios, ficando muito limitado todo o outro conhecimento que os laboratórios independentes ou os fabricantes possuem para a sua realização.

Assim sendo, os capítulos seguintes apresentam o detalhe necessário para a realização dos procedimentos de ensaios a cabos isolados que se realizam nos laboratórios de controlo de qualidade.

Capítulo 4

Laboratório de Alta Tensão

Neste capítulo pretende-se realizar um levantamento dos equipamentos necessários para a realização dos ensaios a cabos isolados em laboratórios de alta tensão. Para tal, será realizado um primeiro levantamento aos equipamentos gerais, ensaios ao choque e à frequência industrial, e por último um aos equipamentos específicos de ensaios a cabos.

Por fim será apresentada uma comparação de equipamentos entre o LAT-FEUP e os LMAT/LAT da empresa fabricante de cabos Solidal, permitindo verificar as limitações que o LAT-FEUP possui, para a realização dos ensaios a cabos isolados.

4.1 - Equipamentos Gerais

Nesta secção são apresentados dos equipamentos necessários para a realização do ensaio ao choque e à frequência industrial. Tendo em conta as instalações e equipamentos que a FEUP possui no LAT e a capacidade disponível para a realização de ensaios para estes dois sistemas de ensaio, será efetuado um levantamento dos equipamentos e respetivas características.

4.1.1 - Equipamento de ensaio ao choque

Para a realização de ensaios ao choque, o LAT-FEUP possui a capacidade de produzir uma onda de frente rápida e normalizada $(1,2/50) \mu s$ com uma tensão de pico máxima de 1200 kV, disponibilizando no total uma energia máxima de 36 kJ, na simulação de descargas atmosféricas.

Os equipamentos que o LAT-FEUP possui para a realização deste tipo de ensaio são os seguintes:

- Gerador de choque;
- Divisor de tensão;
- Unidade de alimentação;
- Unidade de controlo;
- Unidade de processamento de sinal.

A torre do gerador de choque encontra-se representada na Figura 4.1 é composta por doze andares, em que cada andar contém um condensador com uma capacidade de $75 \mu\text{F}$ que lhe confere a capacidade de acumular uma tensão até 100 kV. O conjunto de condensadores existentes na torre do gerador é carregado em paralelo por uma fonte de corrente contínua (através da unidade de alimentação) e encontram-se interligados por intermédio de resistências, denominadas por resistências de carga. Deste modo a fonte vai carregar com polaridade positiva os terminais dos vários condensadores num dos lados, enquanto, os terminais do outro lado dos condensadores ficam negativamente polarizados.

Entre o terminal positivo de cada condensador e o terminal negativo do condensador seguinte encontra-se um explosor de esferas cuja tensão de escorvamento é regulada para um certo valor da tensão de carga, aumentando ou diminuindo a distância entre elas consoante o valor da tensão desejado. A ocorrência do escorvamento dos explosores ocorre quando a carga dos condensadores atinge a tensão de escorvamento, originando um percurso condutor que coloca os condensadores em série, sendo a tensão final obtida através da soma das tensões individuais de cada condensador.

Após o escorvamento dos explosores dá-se o descarregamento em série dos condensadores pelas resistências de cauda, resultando daí um decrescimento exponencial da tensão com uma determinada constante de tempo, permitindo desta forma obter a componente de cauda da onda biexponencial. A componente de frente de subida de tensão é efetuada por um condensador de frente carregado através de uma resistência de amortecimento existente no topo da torre do gerador de choque, obtendo-se desta forma, uma carga exponencial que se irá sobrepor à descarga dos condensadores, permitindo assim obter a onda biexponencial completa com as duas componentes.

Por ajuste dos valores das resistências e das capacidades dos vários condensadores, e também por ajuste dos andares do gerador, é possível obter uma forma de onda de choque de acordo com os parâmetros definidos pela norma aplicável para o ensaio que se pretende efetuar.

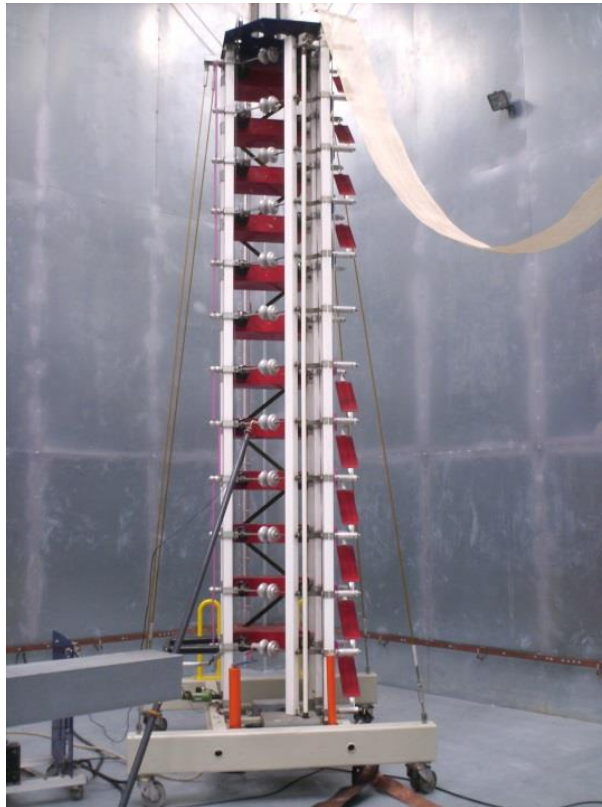


Figura 4.1 - Gerador de choque.

O divisor de tensão existente no LAT-FEUP encontra-se representado na Figura 4.2 e tem como finalidade a medição da tensão a que ocorre a descarga. Este equipamento possui uma capacidade ao nível dos seus condensadores internos de 1200 pF.

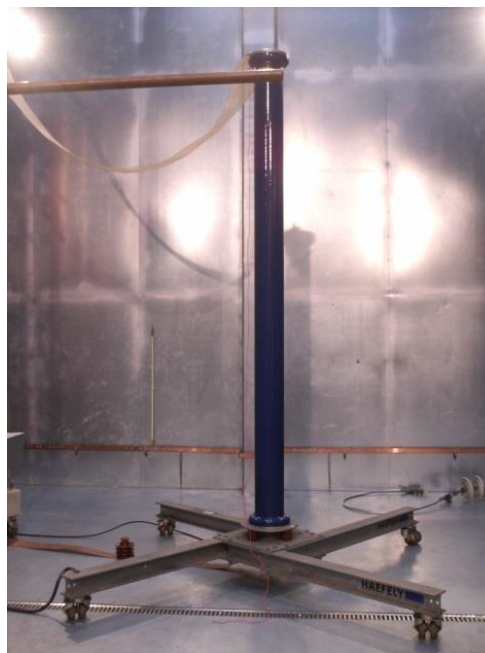


Figura 4.2 - Divisor de tensão.

A unidade de alimentação do gerador de choque, como mostra a Figura 4.3, é uma unidade de retificação sendo responsável pela geração de Alta Tensão, permitindo o carregamento dos condensadores do gerador de choque.

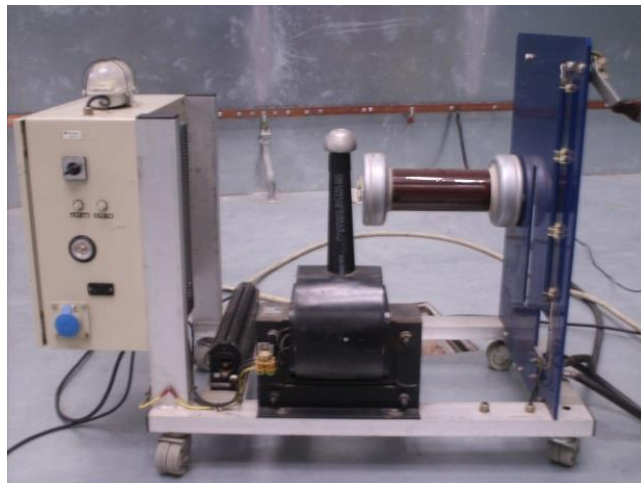


Figura 4.3 - Unidade de alimentação.

A unidade de comando representada na Figura 4.4 é uma unidade que permite estabelecer a tensão de ensaio pretendida através da atuação de um mecanismo existente na torre do gerador de choque que altera as distâncias entre as esferas explosoras em cada andar. A unidade de controlo também permite transmitir a informação à unidade de alimentação para ativar o carregamento dos condensadores no gerador de choque, assim como a velocidade de carregamento dos mesmos e o momento do disparo.



Figura 4.4 - Unidade de comando e DIAS.

A unidade de processamento de sinal, também designada por DIAS (Digital Impulse Analysis System - Sistema Digital de Análise de Impulsos) na Figura 4.4, permite realizar a análise dos valores obtidos através do divisor de tensão, nomeadamente a forma de onda de

tensão, o valor do tempo de frente e de cauda da onda e o valor máximo da tensão, entre outros parâmetros.

4.1.2 - Equipamento de ensaio à frequência industrial

Para a realização do ensaio à frequência industrial, o LAT-FEUP possui os seguintes equipamentos:

- Transformador;
- Divisor de tensão;
- Regulador de alimentação;
- Controlador.

O transformador que o LAT-FEUP possui, representado na Figura 4.5, é composto por dois módulos ($2 \times 300\text{kV}$) o que confere no total uma tensão máxima de 600 kV. Esta configuração permite ainda, em caso de necessidade, utilizar apenas um dos módulos. O conjunto dos dois módulos permite alcançar uma potência máxima de 300 kVA, assim como uma intensidade de corrente de 0,5 A para a tensão máxima gerada pelo conjunto.



Figura 4.5 - Transformador de tensão.

O divisor de tensão representado na Figura 4.6 permite reduzir a amplitude da tensão produzida pelo transformador numa tensão mais reduzida, possibilitando a sua medição. O divisor de tensão apresenta uma potência máxima de 23 kVA, quando sujeito a tensão máxima do transformador de 600 kV a uma frequência de 50 Hz, possuindo ainda uma capacidade interna dos seus condensadores de $200 \text{ pF} \pm 10\%$.



Figura 4.6 - Divisor de tensão.

O regulador de alimentação da Figura 4.7 é o equipamento responsável pela alimentação do transformador e o seu funcionamento é bastante semelhante ao de um autotransformador. Este é regulado através dum controlador, representado na Figura 4.8, sendo manuseado e controlado por um operador.



Figura 4.7 - Regulador de alimentação.



Figura 4.8 - Controlador.

4.2 - Equipamentos Específicos

Nesta secção são apresentados os equipamentos específicos necessários à realização de ensaios a cabos isolados de AT e MT. Aproveitando a colaboração da empresa Solidal, será realizado um levantamento dos equipamentos utilizados no LMAT/LAT da empresa.

Esse levantamento irá incidir somente nos equipamentos específicos para a realização dos ensaios, uma vez que o LAT-FEUP já possui os equipamentos base para o ensaio de choque atmosférico e o ensaio à frequência industrial. Os equipamentos específicos que o LMAT/LAT da Solidal possui para a realização dos ensaios a cabos isolados são apresentados de seguida.

O calibrador na Figura 4.9 é o equipamento permite efetuar a calibração da aparelhagem de medição através do ajuste do nível de sensibilidade (em pC) desejado consoante o tipo de ensaio a realizar. Para tal este equipamento injeta um sinal (através de impulsos) no condensador, propagando-se desta forma ao longo de todo o sistema de ensaio. O calibrador é ligado ao ponto de alimentação do condensador através do terminal positivo, sendo o terminal negativo ligado à massa do condensador.



Figura 4.9 - Calibrador.

Para a detecção das descargas parciais é utilizado um sistema composto por um condensador e um detetor de descargas parciais acoplado na base de sustentação do condensador, representado na Figura 4.10. A utilização do condensador depende do tipo de sistema utilizado na medição de descargas parciais: neste caso este sistema utiliza o condensador, que permitir efetuar a devida compensação capacitiva (equilíbrio entre a capacidade do cabo e a capacidade do transformador).

Relativamente ao detetor de descargas parciais na Figura 4.11, este é ligado ao condensador e ao sistema de terras do laboratório, permitindo assim verificar a existência de descargas parciais através da detecção de correntes de fugas no sistema de terras. Para que as descargas parciais sejam monitorizadas pela aparelhagem de medição de descargas parciais, o detetor de descargas parciais transforma as correntes de fugas detetadas, na ordem dos miliamperes, para milivolts, permitindo assim que a aparelhagem receba os sinais para efetuar posteriormente uma leitura das descargas parciais.



Figura 4.10 - Condensador.



Figura 4.11 - Detetor de descargas parciais.

A aparelhagem de medição de descargas parciais representada na Figura 4.12 efetua a medição dos valores associados às descargas e apresenta-os graficamente, permitindo ao operador avaliar se o cabo testado está em conformidade com os padrões pré-estabelecidos.

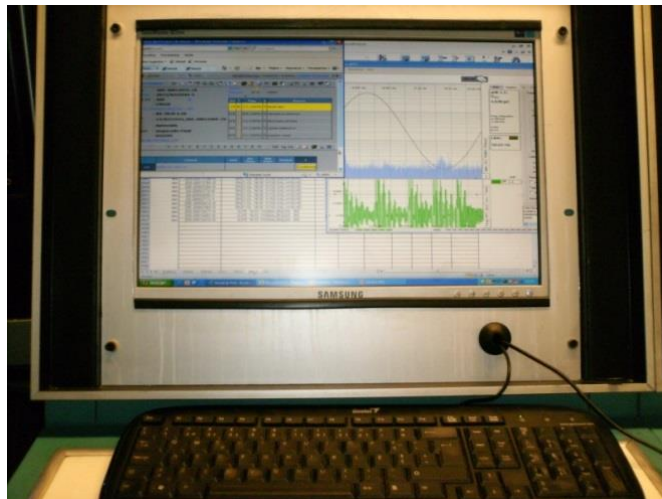


Figura 4.12 - Aparelhagem de medição de descargas parciais.

Aparelhagem de controlo encontra-se representada na Figura 4.13 e permite controlar o nível de tensão e a sua duração consoante os padrões desejados para o ensaio.



Figura 4.13 - Aparelhagem de controlo

Os terminais fim de cabo são equipamentos que permitem anular o efeito de coroa, eflúvios e as descargas parciais nas extremidades dos cabos, existindo dois tipos para o efeito:

- Terminais a óleo;
- Terminais a água.

Os terminais a óleo, com um exemplar representado na Figura 4.14, são normalmente utilizados nos cabos de MT, uma vez que para tensões mais elevadas estes terminais deixam de ser viáveis devido a várias perturbações. Já no caso dos terminais a água, conforme os

representados na Figura 4.15, apresentam um desempenho bastante superior em comparação com os terminais de óleo, daí a sua utilização quer em cabos de MT, AT e MAT.



Figura 4.14 - Terminal fim de cabo a óleo.



Figura 4.15 - Terminais fim de cabo a água.

Os terminais de água possuem uma aparelhagem associada, representada na Figura 4.16, composta por um sistema de controlo e monitorização que permite verificar a pressão do circuito hidráulico e a condutividade da água. Esta aparelhagem possui ainda um depósito onde o circuito hidráulico está ligado, permitindo assim que a água circule consoante a utilização dos terminais (enchimento para realizar ensaios ou vaziamiento para retirada do cabo no final do ensaio). Esta aparelhagem possui ainda acoplado um sistema de refrigeração

representado na Figura 4.17, permitindo que a água que circula no circuito hidráulico seja mantida a uma temperatura constante de 20°C.



Figura 4.16 - Aparelhagem do circuito hidráulico dos terminais fim de cabo a água.



Figura 4.17 - Sistema de refrigeração dos terminais fim de cabo a água.

A fonte de alimentação de corrente contínua permite aplicar uma tensão contínua de acordo com o valor da norma aplicável, permitindo também controlar a sua duração. Este

equipamento é utilizado somente no ensaio de rigidez dielétrica na bainha exterior e encontra-se representado na Figura 4.18.



Figura 4.18 - Fonte de alimentação de corrente contínua.

O microhmímetro representado na Figura 4.19 permite efetuar a medição da resistência elétrica dos cabos. Para se efetuar a leitura o equipamento possui duas pinças, sendo estas colocadas respectivamente em cada uma das extremidades do cabo. Cada pinça possui duas extremidades estando estas extremidades isoladas entre si, o que permite determinar a resistência através da diferença de potencial.



Figura 4.19 - Microhmímetro.

A estufa representada na Figura 4.20 permite efetuar o aquecimento de pequenas amostras de cabo, com uma extensão máxima de 60 cm, às temperaturas desejadas.



Figura 4.20 - Estufa.

O transformador toroidal da Figura 4.21, concebido pela Solidal, permite efetuar o aquecimento do cabo através da indução de uma determinada corrente.



Figura 4.21 - Transformador toroidal.

O transformador de corrente ou intensidade (TI) da Figura 4.22 permite realizar a medição de corrente injetada no cabo em ensaio.



Figura 4.22 - Transformador de corrente (TI).

O aparelho representado Figura 4.23 foi concebido pela Solidal, aparelho de penetração de água, possui um depósito de água com uma determinada altura em relação ao cabo a ser ensaiado, permitindo desta forma simular a penetração de água no cabo (equipamento).



Figura 4.23 - Aparelho de penetração de água.

As sondas de temperatura permitem efetuar a medição da temperatura da bainha exterior e da alma condutora e encontram-se representadas na Figura 4.24, juntamente com a respetiva caixa de ligações das sondas.

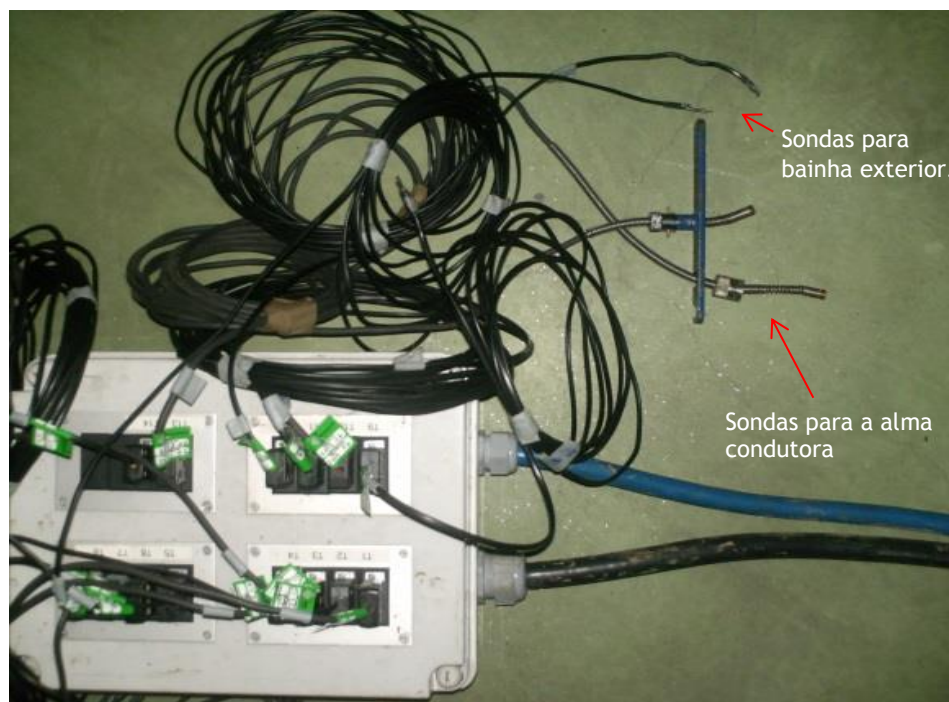


Figura 4.24 - Sondas de temperatura.

Sistema de comando e controlo do aquecimento da Figura 4.25 permite ajustar a temperatura desejada para o ensaio e a duração dos ciclos de aquecimento. Este equipamento é também responsável pelo controlo automático entre a relação temperatura desejada e corrente injetada no cabo através do transformador toroidal.



Figura 4.25 - Sistema de comando e controlo de temperatura.

O condensador padrão representado na Figura 4.26 apresenta um valor fixo de capacidade (valor referência), possibilitando a ponte de medição da capacidade e $\tan \delta$ representada na Figura 4.27. Este equipamento apresenta um valor de referência para comparar com a capacidade do cabo a ser ensaiado, para a obtenção do fator de perdas dielétricas ($\tan \delta$) e da capacidade do cabo.



Figura 4.26 - Condensador padrão.



Figura 4.27 - Ponte de medição da capacidade e $\tan \delta$.

No Anexo B é possível consultar as principais características, marcas e modelos dos equipamentos utilizados no LMAT e no LAT da empresa Solidal, na realização dos diversos ensaios a cabos isolados.

4.3 - Limitações do LAT-FEUP

Com base nos equipamentos e métodos operacionais apresentados neste capítulo, encontra-se sumariada no Anexo C a lista de ensaios a cabos isolados de AT e MT, bem como os equipamentos necessários em cada ensaio. É analisada a existência e disponibilidade dos equipamentos no LMAT/LAT da Solidal e no LAT-FEUP com o intuito de possibilitar uma análise comparativa das instalações existentes, bem como possíveis limitações que o LAT-FEUP possa possuir.

A verificação das limitações no LAT-FEUP para a realização de ensaios de cabos isolados AT e MT baseou-se em duas fases. Numa primeira fase foi realizada uma comparação entre os laboratórios da FEUP e da empresa Solidal, quanto aos equipamentos gerais (choque atmosférico e frequência industrial) e específicos utilizados na realização dos ensaios. Na segunda fase foram verificados os valores das tensões em jogo através do levantamento das normas realizado no capítulo 3.

Quanto à primeira fase das limitações, verificou-se que o LAT-FEUP possui os equipamentos gerais necessários para a realização dos ensaios. Contudo verificou-se que o LAT-FEUP está condicionado à implementação dos ensaios, devido a este não possuir grande parte dos equipamentos específicos para a sua realização.

Quanto à gama de tensões dos ensaios, com recurso ao levantamento efetuado das normas IEC 60502-2 e IEC 60840 no capítulo 3, é possível constatar que os valores

previamente referidos das tensões à frequência industrial e das tensões ao choque atmosférico são perfeitamente viáveis, uma vez que os equipamentos que o LAT-FEUP possui são capazes de gerar esses valores.

Em suma, a realização dos ensaios de cabos isolados de AT e MT no LAT-FEUP está condicionada, devido a este não possuir os equipamentos específicos para o efeito. Para que o LAT-FEUP venha adquirir a competência na realização de ensaios a cabos isolados, este terá que adquirir os equipamentos específicos anteriormente referidos na secção 4.2.

4.4 - Resumo

Neste capítulo foram realizados dois levantamentos distintos. O primeiro diz respeito aos equipamentos gerais utilizados no ensaio de choque atmosférico e do ensaio à frequência industrial no LAT-FEUP. O segundo levantamento incidiu nos equipamentos específicos utilizados na empresa Solidal para a realização dos ensaios de cabos isolados. Perante estes dois levantamentos foi possível constatar as limitações existentes no LAT-FEUP: no que diz respeito aos equipamentos gerais não existem limitações, embora existam limitações evidentes quanto aos equipamentos específicos, uma vez que o LAT-FEUP não possui este tipo de equipamentos.

Capítulo 5

Procedimentos de Ensaios

Neste capítulo são apresentados os procedimentos operacionais dos vários ensaios mencionados no capítulo 3. O levantamento dos procedimentos operacionais foi realizado através do acompanhamento e observação dos ensaios realizados no LMAT/LAT da Solidal.

5.1 - Preparação das extremidades de cabo

Antes da realização dos ensaios propriamente dito é necessário efetuar uma preparação prévia das extremidades do cabo a ser ensaiado. Esta preparação deve-se ao facto de grande parte dos ensaios utilizar terminais fim de cabo.

Uma vez que existem dois tipos de terminais fim de cabo: a água e a óleo, estes requerem diferentes modos de preparação nas extremidades do cabo.

Para preparar as extremidades dos cabos recorre-se a ferramentas adequadas (e.g. na Figura 5.1) para retirar os isolamentos e semicondutores de modo a preparar as extremidades do cabo para ensaio. Na Figura 5.2 e Figura 5.3 estão representadas formas e dimensões exemplificativas, uma vez que os valores variam consoante o modelo e tipo dos terminais.

A utilização de terminais fim de cabo requer alguns cuidados, uma vez que o mau condicionamento das extremidades dos cabos nos terminais pode levar a inúmeras perturbações (por exemplos descargas parciais). Quanto aos terminais de óleo, esses cuidados dizem respeito ao acessórios utilizados, ponta do cabo e anel de ligação (anel entre o isolamento e a bainha exterior), devendo estes acessórios ficar totalmente mergulhados no óleo do terminal. Por fim, no que diz respeito aos terminais de água, após a inserção das extremidades dos cabos nos terminais deve ligar-se a circulação de água e verificar os valores da sua condutividade.

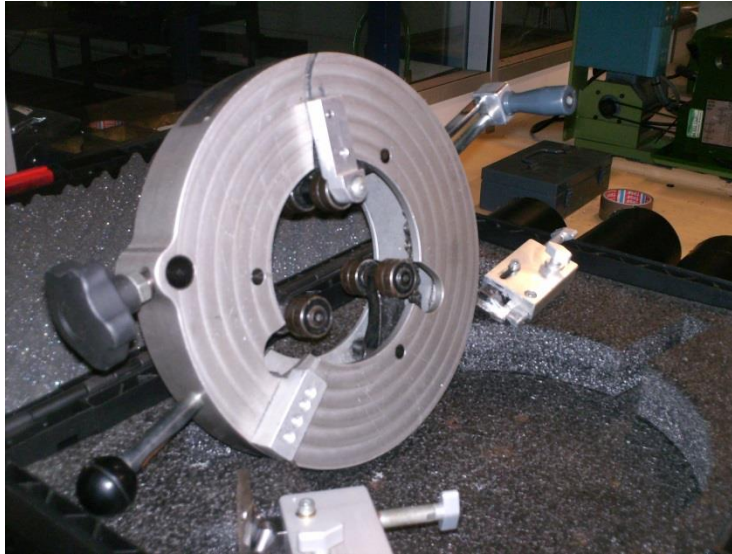


Figura 5.1 - Aparelho de desnudamento das extremidades de cabo.

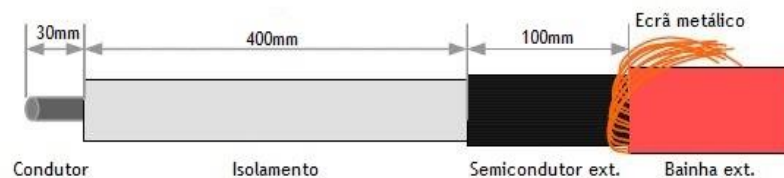


Figura 5.2 - Modo de preparar as extremidades de cabo, para terminais fim de cabo de óleo [9].

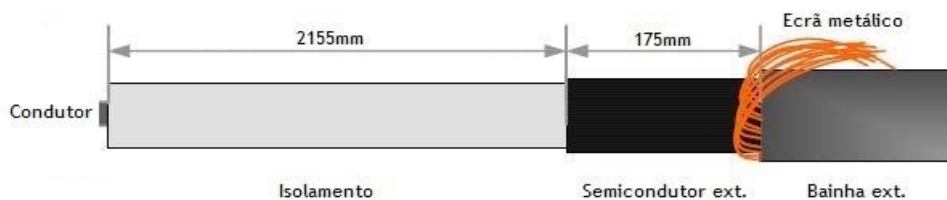


Figura 5.3 - Modo de preparar as extremidades de cabo, para terminais fim de cabo de água da Haefely, modelo CTT 250 (adaptado de [9]).

5.2 - Colocação de sondas de temperatura

A colocação de sondas de temperatura na alma condutora em cabos isolados requer cuidados especiais. Para tal as sondas de temperatura devem ser ligadas ao cabo por meios mecânicos (por exemplo fita adesiva). Uma vez que as sondas podem mover-se devido às vibrações do cabo durante o aquecimento, deve também promover-se um bom contacto térmico entre as sondas e a alma condutora durante os ensaios (por exemplo massas de contacto), para evitar fugas de calor.

A montagem das sondas de temperaturas deve ter como princípio de montagem a Figura 5.4.

Para ter acesso à alma condutora do cabo, deverá cortar-se um pequeno retângulo longitudinal no cabo, removendo cuidadosamente as diversas camadas que o compõem até a alma condutora. No caso de não ser possível retirar as diversas camadas do cabo recorre-se à perfuração das várias camadas. Após a colocação das sondas de temperatura, as camadas removidas deverão ser colocadas de volta no cabo, podendo também utilizar-se massa isolante flexível para reduzir as perdas de calor do cabo, restaurando de certa forma o comportamento térmico do cabo.

Na Figura 5.4 é possível observar-se um exemplo de colocação de sondas de temperatura com o devido condicionamento de massa isolante.

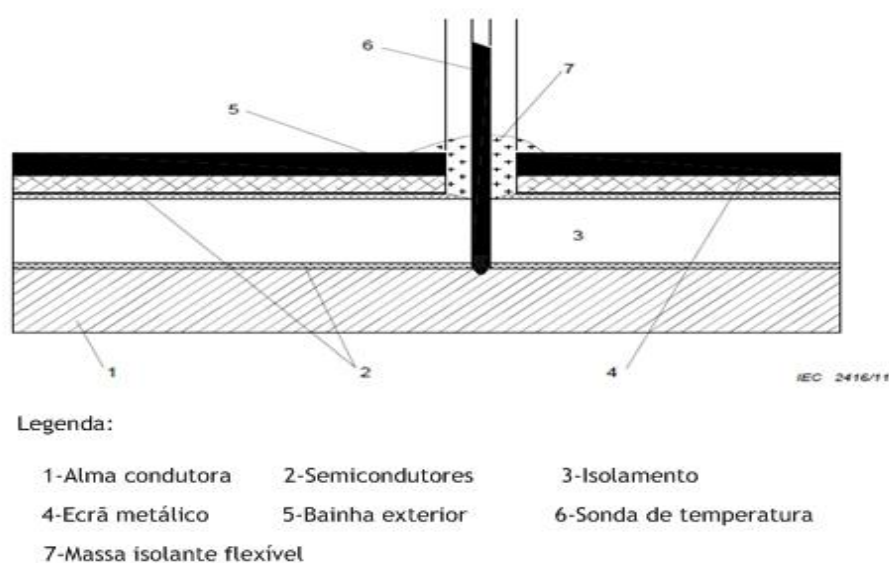


Figura 5.4 - Montagem de sondas de temperatura nas almas condutoras [8].

5.3 - Procedimentos Operacionais

O levantamento dos Procedimentos Operacionais visa analisar o modo operacional e os meios utilizados para a realização dos vários ensaios, em conformidade com as normas IEC 60502-2 e IEC 60840. Para tal, e para uma melhor compreensão, é realizado um levantamento operacional de cada ensaio, visando sintetizar desta forma todo o conhecimento adquirido ao longo dos anos por parte da Solidal, com o objetivo de contribuir para um futuro alargamento do leque de ensaios que o LAT-FEUP pode realizar e utilizar para aprofundar os laços com a comunidade industrial.

5.3.1 - Ensaio de penetração de água

Embora este ensaio não seja um ensaio propriamente elétrico, a sua realização decorre no LAT e necessita de equipamento específico. A finalidade deste ensaio é a determinação da extensão da penetração de água num cabo isolado.

Meios Utilizados:

- Água à temperatura ambiente;
- Transformador de corrente (TI);
- Transformador toroidal;
- Sondas de temperatura isoladas;
- Sistema de comando e controlo de temperatura;
- Aparelho de penetração de água;
- Conectores.

Modo Operacional:

Este ensaio deverá realizar-se numa amostra previamente sujeita ao ensaio de enrolamento. O comprimento da amostra a ensaiar varia de norma para norma, sendo indispensável a consulta da norma aplicável para uma correta execução deste ensaio.

No centro da amostra deve-se cortar um anel com 50 mm de largura, de modo a deixar à vista somente a alma condutora. As superfícies devem ser cortadas de tal forma que os interstícios (espaço entre as várias camadas da constituição do cabo) correspondentes fiquem expostos à ação da água.

Nessa zona central deve então ser aplicado um recipiente devidamente selado que contenha água. Este dispositivo de ensaio é ainda composto por um tubo com um diâmetro interior superior a 10 mm e outro semelhante para ventilação de ar (purga); a altura desde o nível superior da água no depósito até à superfície da alma condutora deve ser de 1000 mm (cf. Figura 5.5).

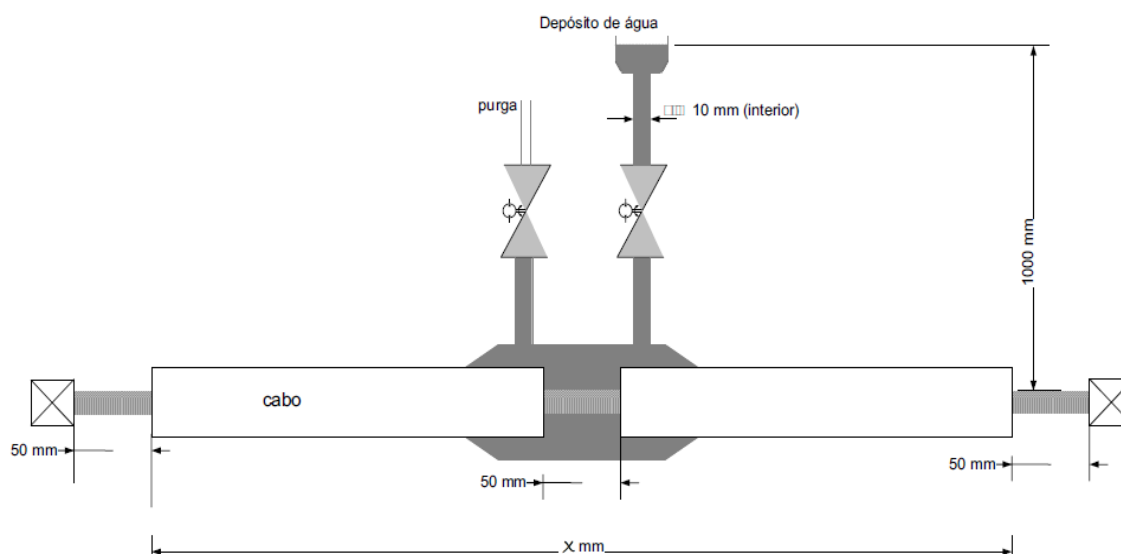


Figura 5.5 - Esquema do aparelho de penetração de água [10].

Após a instalação deste dispositivo, e num período não superior a 5 minutos, procede-se ao enchimento com água à temperatura ambiente.

A amostra é deixada em repouso durante 24 horas e após este período a deverá ser sujeita a 10 ciclos de aquecimento. O aquecimento é realizado através de um transformador toroidal responsável pela indução de uma dada corrente na alma condutora do cabo de forma a atingir uma temperatura estável entre 5°C e 10°C acima da temperatura máxima designada para o cabo em serviço normal.

O aquecimento deverá ser aplicado durante um período mínimo de 8 horas, e a temperatura do condutor deverá manter-se dentro dos limites indicados durante, pelo menos, 2 horas em cada período de aquecimento. O cabo deverá ser arrefecido de forma natural, i.e., à temperatura ambiente durante, pelo menos, 16 horas. Todo este processo de aquecimento e arrefecimento deve ser repetido 10 vezes.

A altura da água deve ser mantida a 1 metro durante todo o ensaio, devendo ser verificado e ajustado o seu nível, se necessário.

A medição da temperatura do cabo é realizada através da colocação de duas sondas de temperatura na alma condutora, com um espaçamento longitudinal entre elas cerca de 30 cm. Uma das sondas é considerada a principal e mede a temperatura real da alma condutora, enquanto a outra sonda serve de segurança/redundância, isto é, está programada para desligar todo o sistema de aquecimento se a temperatura atingir um valor de temperatura predefinido acima da temperatura máxima que é realizado o aquecimento.

Relativamente à montagem geral do ensaio representada na Figura 5.6 e na Figura 5.7, utiliza-se um cabo auxiliar onde é inserido o transformador toroidal e o transformador de corrente, sendo *shuntadas* as suas extremidades com as extremidades da amostra a ser ensaiada através de acessórios de aperto (cf. Figura 5.8). O cabo auxiliar utilizado deve admitir uma passagem de corrente igual ou superior à da amostra.

Por fim, realizam-se os ciclos de aquecimento e de arrefecimento, sendo todo este processo monitorizado pelo sistema de comando e controlo de temperatura. Este sistema permite ajustar automaticamente a corrente induzida pelo transformador toroidal em função da temperatura desejada, ao mesmo tempo que verifica o valor da corrente induzida no condutor através do transformador de corrente (TI). Este sistema garante ainda que a corrente induzida não ultrapassa o valor máximo de corrente admissível da amostra do cabo (valor inserido pelo operador no sistema).

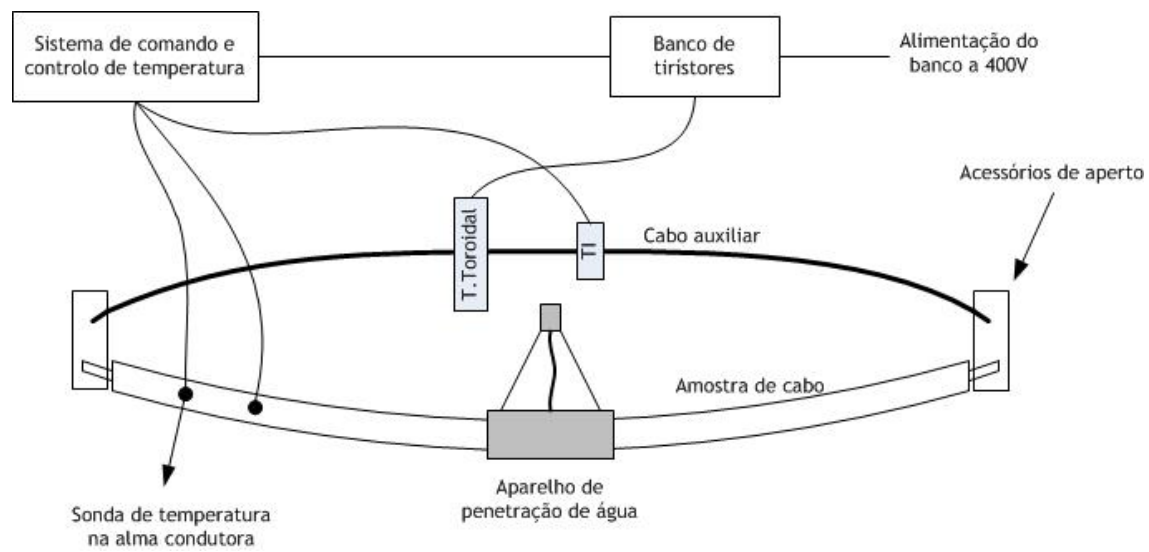


Figura 5.6 - Esquema base de montagem do ensaio de penetração de água.



Figura 5.7 - Montagem do ensaio de penetração de água.



Figura 5.8 - Exemplo de outra montagem do ensaio de penetração de água.

Critério de Conformidade:

Durante o intervalo de tempo em que decorre o ensaio não deverá aparecer água nas extremidades do cabo.

5.3.2 - Ensaio de tensão

Este ensaio permite analisar o comportamento do isolamento do cabo face a solicitações dielétricas superiores às de serviço normal.

Meios Utilizados:

- Terminais fim de cabo;
- Transformador de alta tensão;
- Divisor de tensão;
- Aparelhagem de controlo;
- Conectores.

Modo Operacional:

O ensaio pode ser realizado em bobines ou em amostras de cabo à temperatura ambiente. O ensaio requer uma preparação prévia das extremidades do cabo (cf. secção 5.1), permitindo desta forma a sua inserção nos terminais fim de cabo a água.

A realização das ligações elétricas consiste em ligar a alta tensão proveniente do divisor de tensão à alma condutora, através de um terminal fim de cabo para o efeito. Esta ligação pode ser efetuada por tubo ou fio de cobre revestido com uma manga flexível de alumínio.

O ecrã metálico do cabo deverá ser ligado ao sistema de terras existente no laboratório. A outra extremidade do cabo que não é utilizada para nenhuma ligação elétrica proveniente do exterior é simplesmente inserida num terminal fim de cabo realizando as devidas ligações do ecrã metálico e da alma condutora no próprio terminal fim de cabo como se pode verificar na Figura 5.9.

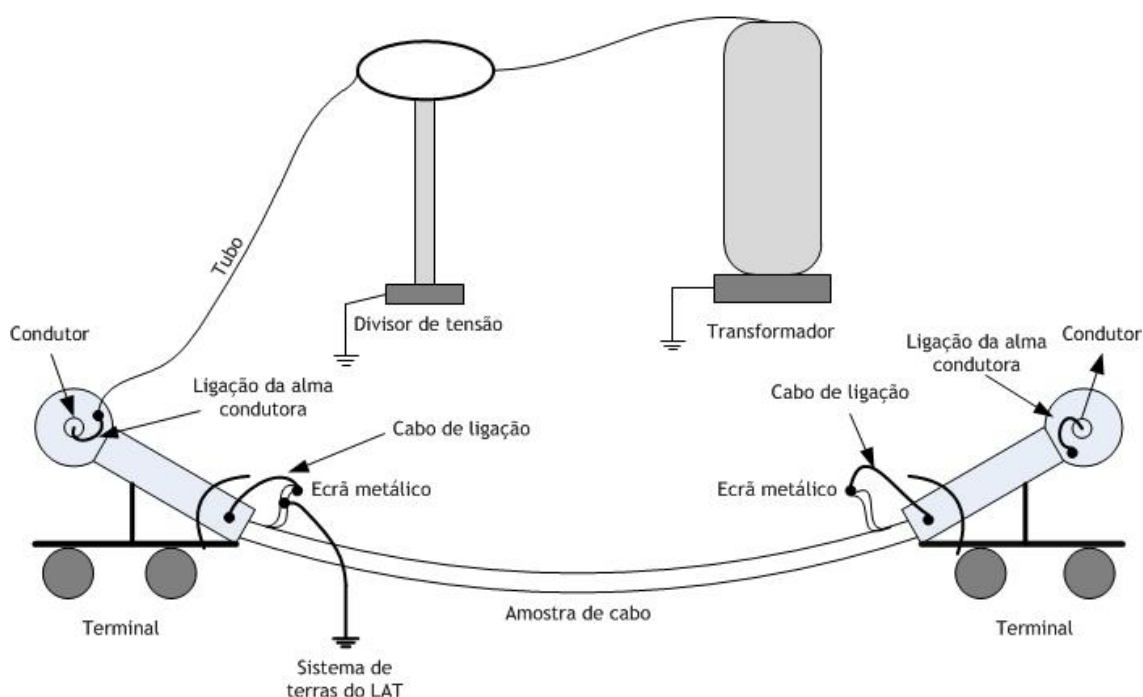


Figura 5.9 - Esquema base de montagem do ensaio de tensão.

Por fim o cabo deverá ser submetido ao ensaio de tensão aplicando um valor de tensão e uma duração consoante a norma aplicável.

Na Figura 5.10 é possível observar um exemplo de montagem do ensaio de tensão que é realizado nos ensaios de rotina. Na Figura 5.11 pode-se ver a montagem do ensaio agora referente aos ensaios de tipo a amostra é colocada na forma de “U” por uma questão de ordem prática de montagem.



Figura 5.10 - Montagem do ensaio de tensão (ensaio de rotina).



Figura 5.11 - Montagem do ensaio de tensão (ensaio de tipo).

Critério de Conformidade:

Como requisito para que o cabo seja validado, não poderá ocorrer a perfuração do isolamento durante o tempo em que o cabo está sujeito à tensão.

5.3.3 - Ensaio de rigidez dielétrica de bainhas exteriores

A finalidade deste ensaio é verificar se a bainha exterior do cabo apresenta defeitos (perfurações ou deformações).

Meios Utilizados:

- Fonte de tensão de corrente contínua;
- Cabos de ligação e cabos de terra, tomadas de terra;
- Braçadeira condutora (em geral de cobre);
- Conectores.

Modo Operacional:

Este ensaio é realizado numa bobina de cabo completo à temperatura ambiente. Antes de se proceder ao ensaio propriamente dito é necessário preparar uma das extremidades do cabo a ser ensaiado, desnudá-lo de forma semelhante os terminais de óleo, aplicando posteriormente uma braçadeira condutora sobre a bainha exterior fixando-a bem, de modo a promover um bom contacto elétrico.

De seguida procede-se às ligações elétricas, consistindo em ligar a uma tomada de terra de proteção do laboratório os seguintes pontos:

- A massa do aparelho de ensaio (fonte de tensão);
- O cabo de massa proveniente do cabo tensão, caso exista;
- A bobina (se for metálica);
- A braçadeira colocada na bainha exterior;
- Conectores.

A montagem é completada com a ligação do cabo de tensão proveniente da fonte de tensão ao ecrã metálico do cabo a ser ensaiado, através de uma pinça (cf. Figura 5.12).

A aplicação do valor da tensão de ensaio em corrente continua e sua duração, entre ecrã metálico e a bainha exterior (bainha exterior com uma camada de semiconductor), deverão seguir a norma aplicável.



Figura 5.12 - Montagem de ensaio de rigidez dielétrica de bainhas exteriores.

Critério de Conformidade:

Durante a duração do ensaio, não deverá ocorrer perfuração ou deformações da bainha exterior.

5.3.4 - Ensaio de ciclos de aquecimento

A finalidade deste ensaio é simular o funcionamento do cabo em regime permanente.

Meios Utilizados:

- Transformador de alta tensão;
- Transformadores de corrente (TI);
- Transformadores toroidais;
- Terminais fim de cabo;
- Sistema de comando e controlo de temperatura;
- Sondas de temperatura (isoladas);
- Aparelhagem de controlo;
- Conectores.

Modo Operacional:

Este ensaio é realizado com base num determinado número ciclos (aquecimento e arrefecimento), em que a duração de cada ciclo e o comprimento da amostra de cabo submetida a esses ciclos está dependente das normas aplicáveis.

No que diz respeito ao aquecimento, o condutor deverá ser aquecido progressivamente até atingir um intervalo de temperatura de 5°C a 10°C acima da temperatura de funcionamento normal do condutor e mantido durante pelo menos 2 horas a essa temperatura. Caso não seja possível atingir ou manter a temperatura deve aplicar-se uma manta térmica para o efeito e todo o processo de aquecimento deve ter uma duração de acordo com a norma aplicável (em geral 8 horas). Para se efetuar o aquecimento do cabo, é induzida uma corrente através de um transformador toroidal, ajustando a corrente induzida (medida pelo TI) no cabo em função da temperatura desejada, com o auxílio do sistema de comando e controlo de temperatura.

Quanto ao arrefecimento da amostra, este consiste simplesmente em deixar a amostra à temperatura ambiente do laboratório, durante um determinado período, em concordância com as normas aplicáveis.

Este ensaio pode ser realizado com ou sem tensão durante todo o período dos ciclos. No caso de cabos de MT este ensaio é realizado sem tensão, enquanto no caso dos cabos de AT este ensaio é realizado com um certo valor de tensão de acordo com as normas aplicáveis.

No caso de ensaios a cabos de MT a montagem para este ensaio consiste em colocar a amostra com uma curva na forma de “U” com um determinado diâmetro (de acordo com o ensaio de enrolamento das normas aplicáveis), em que as duas extremidades da amostra são *shuntadas* por um tubo ou cabo (em geral de alumínio) com uma secção superior, que permita uma maior passagem de corrente em relação à da amostra a ser ensaiada.

A ligação entre o shunt e as extremidades da amostra é efetuada através de acessórios de aperto para o efeito. Antes de *shuntar* as extremidades do cabo, este deve ser inserido num transformador toroidal e no transformador de corrente (TI).

Quanto a colocação das sondas de temperatura, estas poderiam ser colocadas diretamente na alma condutora, uma vez que a amostra não está sujeita a tensão. Contudo, a realização deste ensaio está inserido no contexto dos ensaios de tipo, sendo o ensaio de ciclos de aquecimento procedido de outros ensaios que avaliam a degradação das características do isolamento do cabo (e.g. medição de descargas parciais), como tal não se pode perfurar o isolamento, devendo utilizar-se o mesmo princípio de aquecimento assim como a colocação das sondas de temperatura dos cabos de AT, mais a frente referido. Na Figura 5.13 é possível observar o esquema base de montagem do ensaio para os cabos de MT.

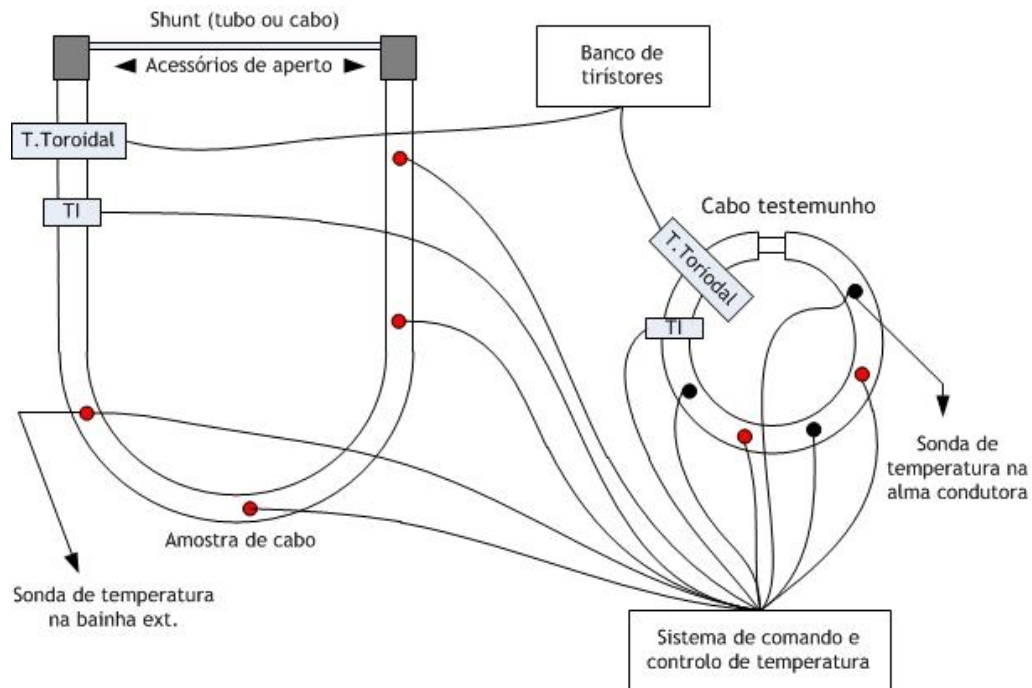


Figura 5.13 - Esquema base de montagem do ensaio de ciclos de aquecimento, cabos de MT.

No caso de ensaios a cabos de AT, a medição da temperatura do cabo é realizada através de um cabo testemunho, representado na Figura 5.14. Este cabo consiste em utilizar uma outra amostra do mesmo cabo que vai ser ensaiado, geralmente com um comprimento superior a 5 m, utilizando para o efeito um outro circuito independente do ensaio propriamente dito. Essa amostra deverá apresentar um formato em anel, em que o cabo deverá também ser inserido num transformador toroidal para efetuar o aquecimento e no transformador de corrente (TI) para medida, antes do fecho do anel. São geralmente colocadas três sondas de temperatura na alma condutora, em pontos distintos, para melhor precisão da temperatura real, tendo uma sonda a função de desligar o sistema de aquecimento em caso da temperatura exceder um determinado valor de temperatura predefinido (por questões de segurança). Também são colocadas em posições distintas mais duas sondas de temperatura na bainha exterior, podendo ser utilizadas mais sondas.



Figura 5.14 - Montagem do cabo testemunho.

Neste caso, em que a amostra principal está sujeita a tensão, as sondas de temperatura não são colocadas na alma condutora mas sim na bainha exterior do cabo, permitindo desta forma comparar a temperatura da amostra através da bainha exterior entre o cabo testemunho e a amostra principal. Essa comparação de temperaturas é efetuada pelo sistema de comando e controlo de temperatura que permite fazer o ajuste devido entre a relação da corrente induzida pelos transformadores toroidais (amostra principal e cabo testemunho) e a temperatura medida na alma condutora no cabo testemunho.

No caso dos ensaios de cabos de AT a montagem principal sofre algumas alterações uma vez que o cabo vai estar sujeito a tensão. Deste modo deve preparar-se as extremidades da amostra para que se possa efetuar a sua inserção nos terminais fim de cabo. Estes terminais não podem ser terminais fim de cabo a água ou a óleo uma vez que neste ensaio são utilizados ciclos de aquecimento com durações elevadas de aquecimento, sendo utilizados os terminais fim de cabo como os usados para a passagem de linhas aéreas para subterrâneas.

A ligação elétrica para a alimentação da tensão é efetuada por uma das extremidades do cabo, por um tubo ou por fio de cobre revestido com uma manga flexível de alumínio, entre a saída do divisor de tensão e um terminal fim de cabo. O ecrã metálico da amostra deverá ser ligado ao sistema de terras do laboratório, assim como as respetivas massas dos terminais fim de cabo (cf. Figura 5.15).

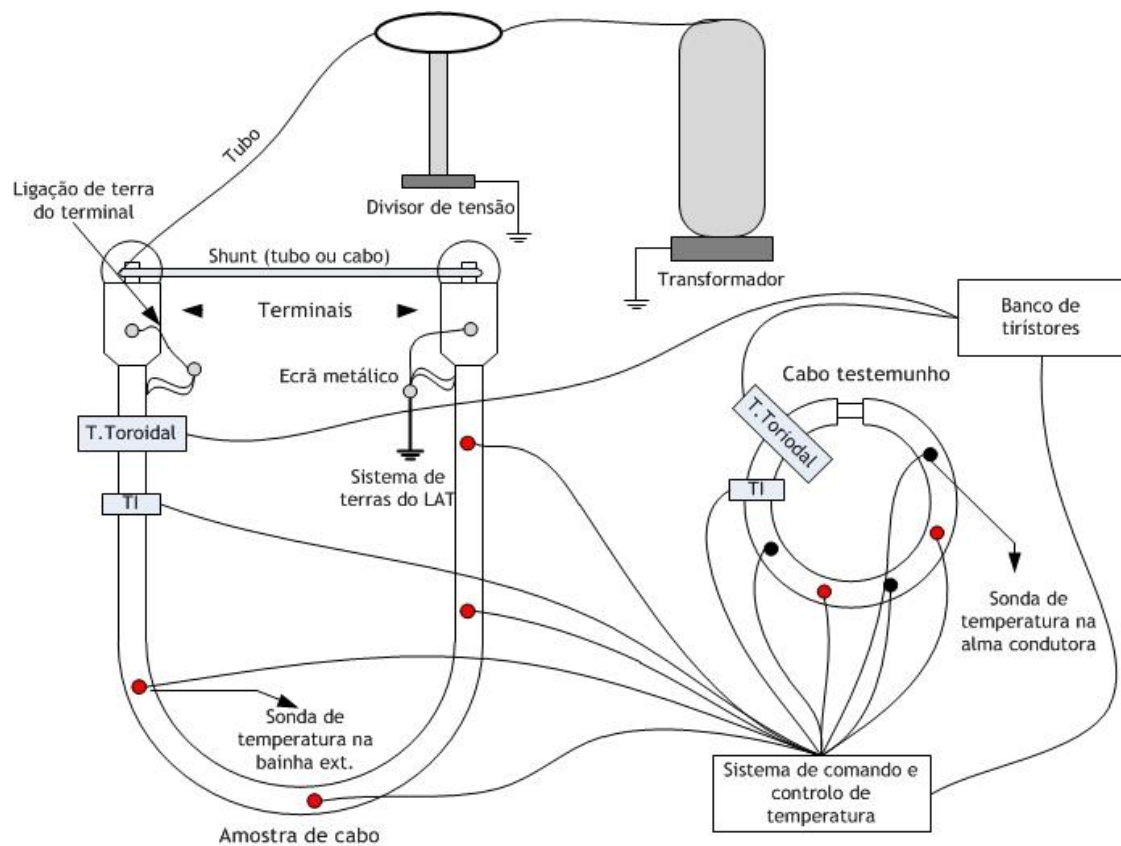


Figura 5.15 - Esquema base de montagem do ensaio de ciclos de aquecimento, cabos de AT.

Na Figura 5.16 é possível observar parte de uma montagem (amostra principal) do ensaio de ciclos de aquecimento para cabos de AT, como os respetivos terminais fim de cabo de transição de linhas aéreas para subterrâneas. De um modo geral quando se realiza este ensaio para qualificar a amostra de cabo, sendo também utilizados estes terminais para proceder à sua qualificação em simultâneo, visto que os outros terminais (água e óleo) utilizados em laboratório não são viáveis para este tipo de ensaio.



Figura 5.16 - Montagem do ensaio de ciclos de aquecimento, na amostra principal.

Critério de Conformidade:

Após a realização deste ensaio é efetuado uma medição de descargas parciais, permitindo desta forma verificar através da existência de descargas parciais para um nível de sensibilidade de 5 pC, a degradação das características de isolamento do cabo.

5.3.5 - Ensaio de choque atmosférico

Este ensaio tem como finalidade a análise do comportamento de cabos com isolamento extrudido.

Meios Utilizados:

- Gerador de choque;
- Sistema de comando do gerador de choque;
- Sistema de aquisição das formas de onda;
- Transformadores toroidais;
- Transformadores de corrente;
- Divisor de tensão;
- Sistema de comando e controlo de temperatura;
- Sondas de temperatura (isoladas);

- Terminais fim de cabo;
- Conectores.

Modo Operacional:

O ensaio será realizado numa amostra com um comprimento mínimo útil de 10 m, sem ter em conta o comprimento gasto pelos terminais fim de cabo. As pontas do cabo a colocar nos terminais de água deverão ser preparadas de acordo com as boas práticas desta operação (ver secção 5.1).

Antes do início propriamente dito do ensaio ao choque atmosférico, o cabo deverá ser previamente aquecido até atingir uma temperatura de 5°C a 10°C acima da sua temperatura de funcionamento, num período de estabilização pelo menos 2 horas. Para realizar o aquecimento recorre-se a duas montagens: uma é relativa à amostra de cabo a ser ensaiado e a outra relativa a um cabo testemunho (cf. o conceito na subsecção 5.3.4). Em ambas as montagens são utilizados transformadores toroidais que induzem um determinado valor de corrente nos cabos, com o auxílio do sistema de comando e controlo de temperatura que faz o devido ajuste entre a corrente induzida (medida pelos TI) e a temperatura desejada na alma condutora no cabo testemunho. O ajuste da corrente induzida na amostra de cabo é efetuada pela leitura e comparação de temperaturas nas bainhas exteriores no cabo testemunho e na amostra (cf. Figura 5.17).

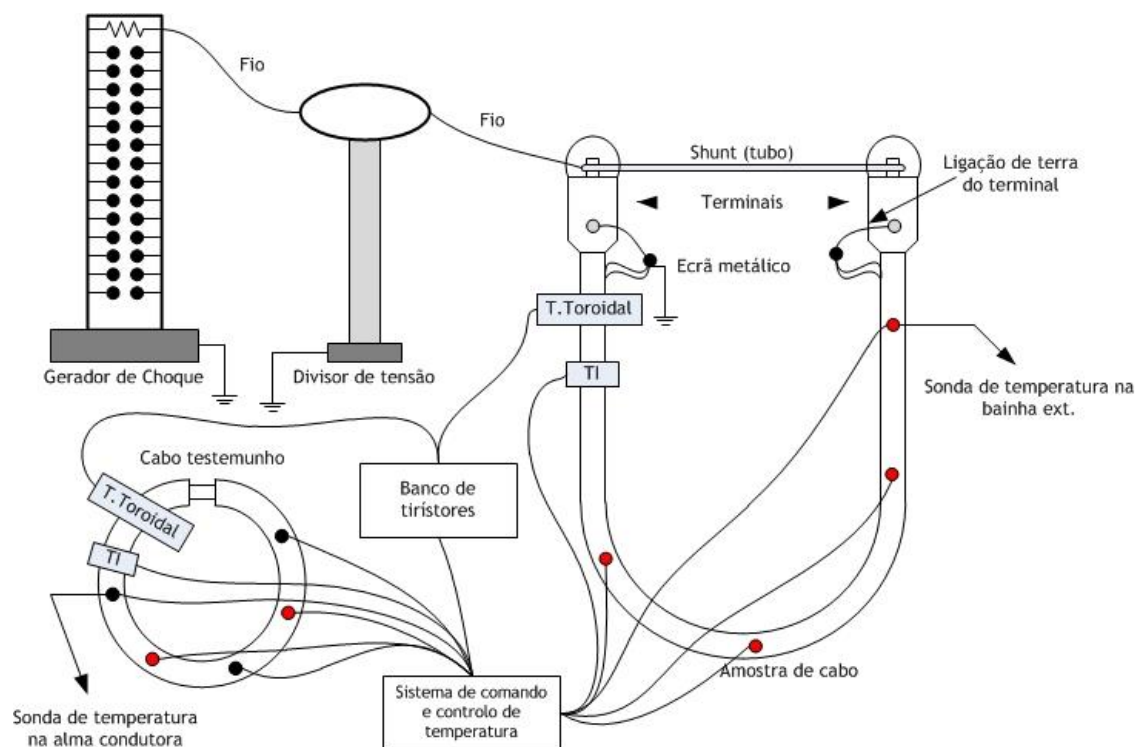


Figura 5.17 - Esquema base de montagem do ensaio de choque atmosférico.

A colocação das sondas de temperaturas apresenta algumas diferenças: na amostra são colocadas só sondas de temperatura na bainha exterior, uma vez que a amostra vai estar sujeita a períodos de tensão, sendo utilizado um cabo testemunho onde são colocadas sondas de temperatura na alma condutora e na bainha exterior, permitindo assim a comparação da temperatura acima referida.

Na montagem da amostra de cabo após a colocação dos transformadores (toroidal e de corrente), as extremidades devem ser inseridas em terminais fim de cabo, *shuntando* os dois terminais por intermédio de um tubo ou cabo (em geral de alumínio). Este acessório deverá apresentar uma corrente admissível superior à do cabo a ser ensaiado. O cabo testemunho deve apresentar um formato em anel onde são também colocados os transformadores, sendo as extremidades ligadas com recurso a acessórios de união (i.e. acessórios de aperto) para o efeito.

Na montagem dos equipamentos deve ter-se um especial cuidado com a colocação dos transformadores, toroidal e de corrente, devendo ambos ser colocados com a mesma orientação de fluxo magnético.

Após o aquecimento, e o devido período de estabilização, todo o sistema de aquecimento é desligado, dando início ao ensaio de choque atmosférico. De acordo com a norma IEC 60230, o ensaio deverá começar com o ajuste da forma de onda com cerca de 50%, 60% e 80% do valor de pico definido pelas normas aplicáveis (o ajuste da forma de onda por parte da Solidal, é realizada somente para os 50%). O tempo de frente deverá ter entre 1 μs a 5 μs e o tempo de cauda entre 40 μs a 60 μs . Para tal, será necessário ajustar as resistências série e paralelo do gerador de choque, de forma a serem atingidos os respetivos tempos. Durante o ensaio é necessário controlar a temperatura da alma condutora por forma a que esta respeite o critério de temperatura. Depois de obtidos os tempos de frente e cauda e as condições de temperatura estarem estabelecidas o cabo deverá ser sujeito a 10 ondas de choque positivas e 10 ondas choque negativas.

A ligação da amostra em ensaio sujeita aos choques atmosféricos é efetuada por um fio de cobre entre o divisor de tensão e a amostra.

Na Figura 5.18 é possível observar a montagem da amostra principal do ensaio de choque atmosférico, com os respetivos equipamentos necessários a sua realização.



Figura 5.18 - Montagem do ensaio de choque atmosférico, na amostra principal.

Critério de Conformidade:

O resultado do ensaio é considerado conforme se não houver qualquer rutura no isolamento do cabo em ensaio.

5.3.6 - Medição de descargas parciais

O objetivo deste ensaio é verificar a qualidade do dielétrico empregue na fabricação do cabo monitorizando, o nível de descargas parciais.

Meios Utilizados:

- Terminais fim de cabo;
- Transformador de alta tensão;
- Divisor de tensão;
- Condensador;
- Calibrador de descargas parciais;
- Aparelhagem de medida de descargas;
- Aparelhagem de controlo;
- Transformadores toroidais;
- Transformadores de corrente;
- Sistema de comando e controlo de temperatura;
- Sondas de temperatura (isoladas);
- Conectores.

Modo Operacional:

O ensaio é realizado em bobina ou em amostra de cabo à temperatura ambiente, se o ensaio for realizado em amostra de cabo, o comprimento de amostra deve estar de acordo com as normas aplicáveis.

Para a realização do ensaio é necessário em primeiro lugar preparar as pontas do cabo a ensaiar conforme referido na secção 5.1. Uma vez preparadas as extremidades do cabo, estas são introduzidas nos terminais fim de cabo.

Após a ligação das extremidades do cabo nos respetivos terminais, são efetuadas as ligações elétricas. Essas ligações consistem em ligar um tubo (ou fio de cobre revestido com uma manga flexível de alumínio) proveniente do condensador a um terminal fim de cabo para o efeito, ficando a outra extremidade do cabo apenas inserida num terminal fim de cabo sem qualquer tipo de ligação elétrica proveniente do exterior. O ecrã metálico do cabo deverá ser ligado através de um conector ao sistema de terras do laboratório (cf. Figura 5.19).

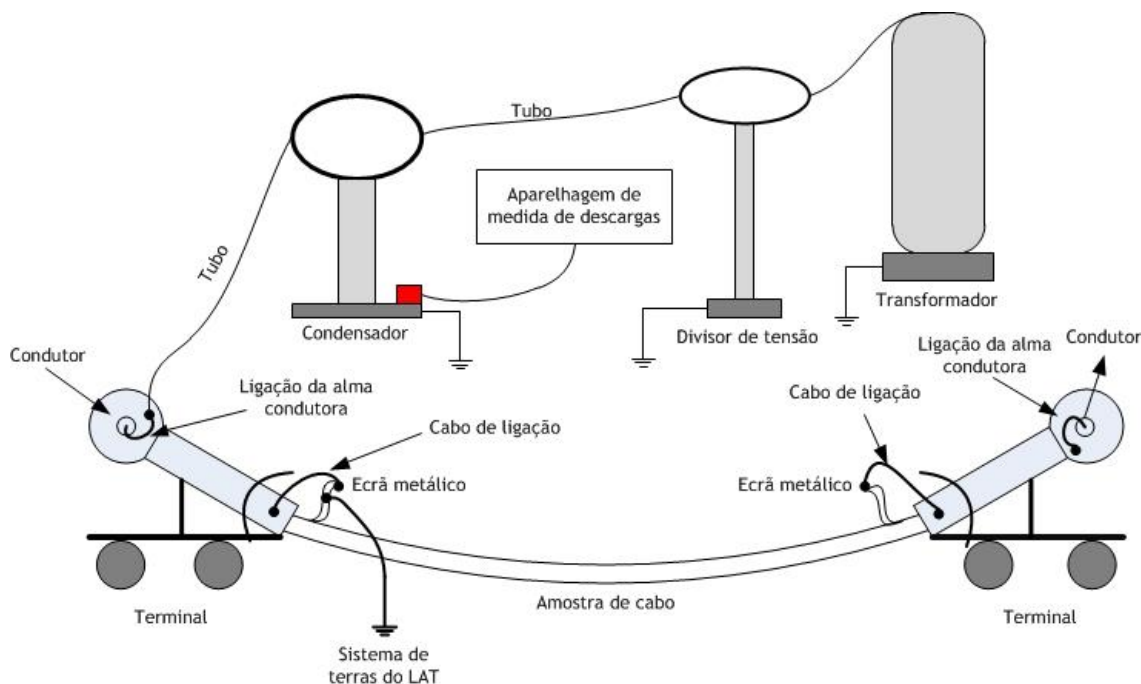


Figura 5.19 - Esquema base de montagem para medição de descargas parciais, cabos de MT (ensaio de tipo).

Finalizadas as ligações elétricas procede-se à calibração da aparelhagem de medida, ajustando o nível de sensibilidade pretendido com o auxílio de um calibrador. A ligação do calibrador consiste em ligar o terminal positivo que este aparelho possui ao ponto de alimentação do condensador, e ligar o terminal negativo à massa do condensador, que por sua vez está ligado ao sistema de terras do laboratório. Uma vez efetuada a devida calibragem do sistema de ensaio, retira-se o calibrador do sistema.

Por último, realiza-se a alimentação do cabo com tensão através do condensador, ajustando o valor de tensão e duração com o auxílio da aparelhagem de controlo. Os valores das tensões de ensaio, nível de sensibilidade das descargas e a duração do ensaio são definidos pelas normas aplicáveis a este ensaio.

Contudo se a medição das descargas parciais pertencer à categoria dos ensaios de tipo nos cabos isolados de AT, as medições são realizadas em função da temperatura ambiente e a uma temperatura acima da sua temperatura de funcionamento normal. Quanto à mediação das descargas parciais à temperatura ambiente, o modo operacional é o mesmo descrito acima.

Relativamente à medição de descargas parciais a uma temperatura acima da sua temperatura de funcionamento normal, o condutor deverá ser aquecido até atingir uma temperatura entre 5°C a 10°C acima da temperatura do seu funcionamento normal. Todo o modo operacional do sistema de aquecimento é igual ao referido na subsecção 5.3.4, contudo não existem ciclos de aquecimento: na medida em que após ser atingida a temperatura desejada no condutor, esta deverá ser mantida dentro dos limites de temperatura referidos, durante pelo menos 2 horas. Também o formato da amostra em “U” é por questões de ordem prática de montagem, mas não seguindo o critério da distância de diâmetro da forma de “U” como é referido no ensaio de ciclos de aquecimento (cf. Figura 5.20). Após o devido período de estabilização, o sistema de aquecimento é desligado para se efetuar de seguida a medição das descargas parciais. O modo operacional é igual ao referido para a mediação das descargas parciais à temperatura ambiente.

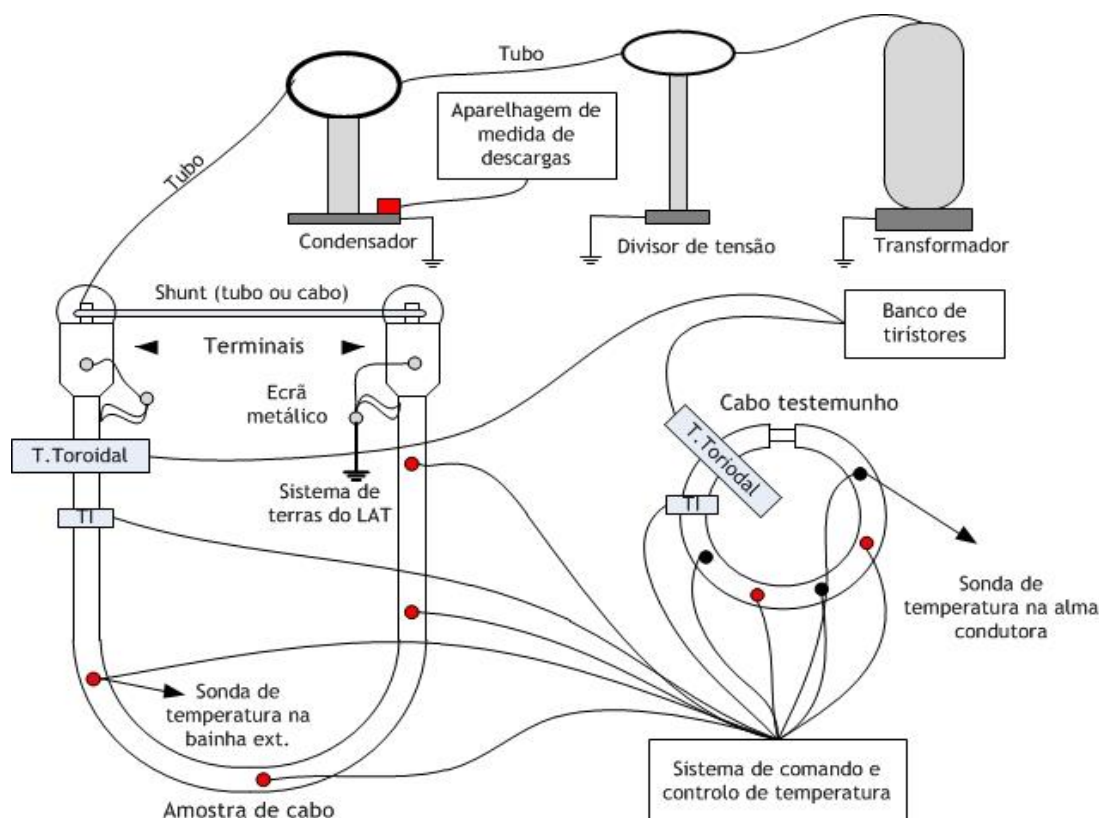


Figura 5.20 - Esquema base de montagem para medição de descargas parciais, cabos de AT (ensaio de tipo).

Por uma questão de ordem prática nos cabos isolados de AT (ensaios de tipo), após a montagem do ensaio com o devido sistema de aquecimento incorporado, realiza-se a medição das descargas parciais à temperatura ambiente sendo depois efetuado o devido aquecimento do condutor de forma a realizar a medição das descargas parciais à temperatura acima da sua temperatura de funcionamento normal.

Critério de Conformidade:

Os valores das descargas parciais deverão ser menores que os máximos especificados nas normas aplicáveis, consoante o tipo de ensaio.

5.3.7 - Medição da resistência elétrica

O objetivo da medição de resistência elétrica prende-se com a obtenção do valor da resistência elétrica do cabo.

Meios Utilizados:

- Microhmímetro;
- Termómetro.

Modo Operacional:

A medição da resistência elétrica pode ser realizada em bobines (mais usual) ou em amostras de cabo, na Figura 5.21 é possível observar a montagem da medição. Para efetivar a medição deve-se ter em conta o seguinte procedimento:

- Desnudar as extremidades do condutor em ensaio, em cerca de 5 cm;
- Ligar as garras do microhmímetro às extremidades;
- Ler e registar a resistência elétrica obtida;
- Registar a temperatura ambiente;
- Corrigir a resistência elétrica medida para a temperatura de 20°C e para as unidades Ω/km , de acordo com as normas aplicáveis.



Figura 5.21 - Montagem da Medição da Resistência Elétrica.

Critério de conformidade:

Os valores da resistência elétrica calculada deverão ser menores que o máximo especificado nas normas aplicáveis ao produto em ensaio.

5.3.8 - Medição da resistividade elétrica dos semicondutores

O objetivo do ensaio é a determinação da resistividade elétrica dos semicondutores.

Meios Utilizados:

- Estufa;
- Fita de cobre ou tinta de prata;
- Circuito elétrico;

- Paquímetro;
- Equipamento de corte.

Modo Operacional:

Do cabo a ensaiar deverá ser retirada uma amostra com 300 mm de comprimento, retirando de seguida a bainha exterior e o ecrã metálico e eventuais fitas hidroexpansivas. A amostra deverá ser dividida em duas, com 150 mm cada.

A preparação da amostra para medição da resistividade do semiconductor interno consiste em cortar longitudinalmente uma das amostras de modo a obter duas metades, retirando a alma condutora e o semiconductor externo, conforme representado na Figura 5.22.

A preparação da amostra para a medição da resistividade do semiconductor externo consiste em utilizar a outra amostra no qual se deve excluir a bainha exterior, bem como o ecrã metálico e eventuais fitas hidroexpansivas, de acordo com o representado na Figura 5.23.

Para realizar a medição utiliza-se uma fita de cobre de 10 mm de largura. Estas tiras constituirão os elétrodos de potencial (B e C) e os elétrodos de corrente (A e D). A conexão dos elétrodos é efetuada com recurso a garras adequadas.

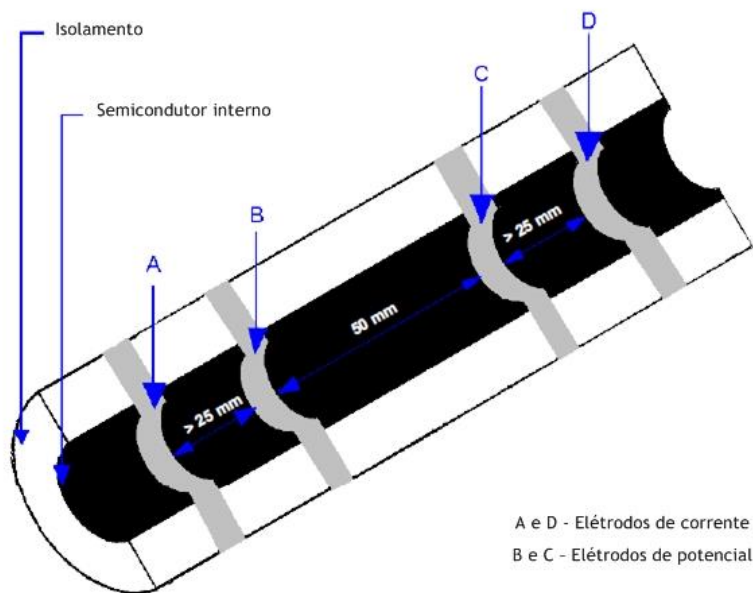


Figura 5.22 - Preparação da amostra para a medição da resistividade do semiconductor interno [11].

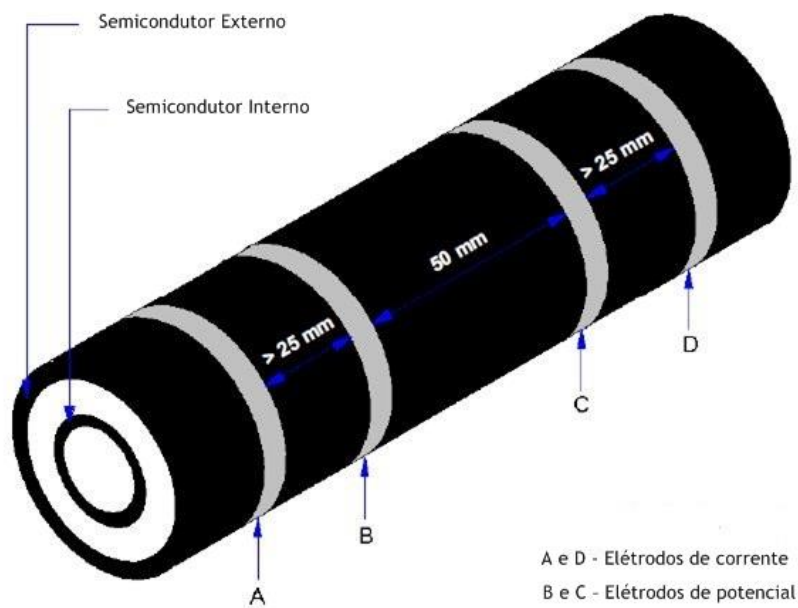


Figura 5.23 - Preparação da amostra para medição da resistividade do semicondutor externo [11].

A medição da resistividade dos semicondutores (interno e externo) deve ser efetuada à temperatura máxima admissível do cabo em funcionamento normal, com uma tolerância de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

O conjunto (amostra e ligações aos eléctrodos) deverá ser colocado dentro de uma estufa e deixado à temperatura indicada, pelo menos 30 minutos antes de ser efetuada qualquer medição. A medição da resistividade dos semicondutores é realizada em duas fases distintas: numa primeira fase a medição é realizada diretamente nas amostras e numa segunda fase a medição é realizada após as amostras terem sido submetidas a um tratamento de envelhecimento. Este tratamento de envelhecimento consiste em colocar as amostras na estufa e submetê-las a uma temperatura de 10°C (com uma tolerância de 2°C) acima da temperatura máxima admissível do cabo, durante 168 horas.

Após o devido período de estabilização em ambas as situações, e com o recurso ao circuito eléctrico na Figura 5.24, realiza-se a medição das tensões no circuito com o auxílio dos voltímetros V_1 e V_2 , para posterior cálculo da resistividade dos semicondutores. Para tal injeta-se entre os eléctrodos (A e D) uma corrente alternada a 50 Hz, medindo de seguida a tensão entre os eléctrodos (B e C) e a tensão nos eléctrodos (A e D) com o recurso a um resistência incorporada (valor conhecido) no circuito, calculando-se a potência do circuito através da expressão (5.1). O valor da potência do circuito não deverá exceder os 100 mW, devendo para tal ajustar-se o valor da corrente injetada entre os eléctrodos (A e D).

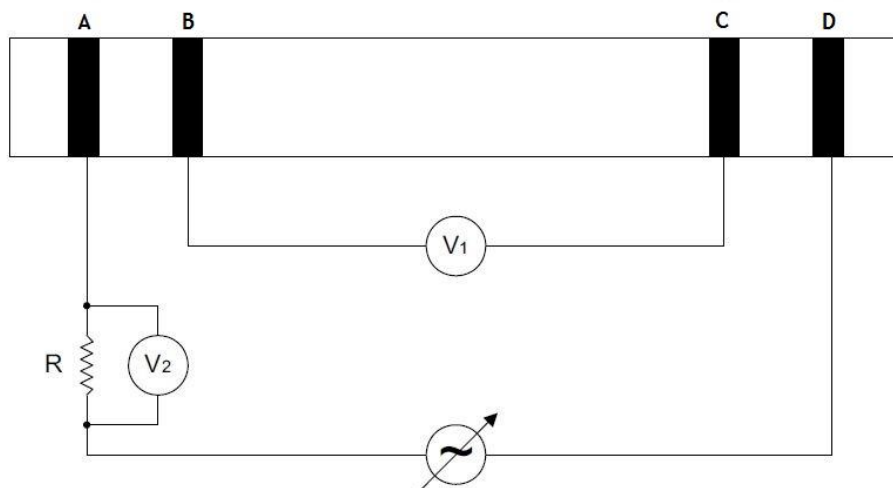


Figura 5.24 - Esquema elétrico do princípio de funcionamento [11].

$$\frac{V_1 \times V_2}{R} \leq 100 \text{ (mW)} \quad (5.1)$$

Na Figura 5.25 é possível observar toda a montagem para realizar a medição das resistividades dos semicondutores, com o respetivo circuito elétrico e devidas ligações elétricas nos semicondutores.



Figura 5.25 - Montagem do ensaio de medição da resistividade elétrica dos semicondutores.

Os valores das resistividades elétricas dos semicondutores são dados pelas seguintes expressões [11]:

Semicondutor externo (isolamento):

$$\rho_i = \frac{V_1}{V_2} \times \frac{S}{L} \times R \quad (5.2)$$

Semicondutor interno (condutor):

$$\rho_e = \frac{\pi}{8} \times \frac{V_1}{V_2} \times \frac{D^2 - d^2}{L} \times R \quad (5.3)$$

Em que:

ρ_i - Resistividade do semicondutor interno ($\Omega.m$);

ρ_e - Resistividade do semicondutor externo ($\Omega.m$);

V_1, V_2 - Leitura dos voltímetros (V);

R - Resistência do circuito de ensaio (Ω);

L - Distância entre os elétrodos de potencial “A” (m);

D - Diâmetro exterior do semicondutor interno (m);

d - Diâmetro exterior do condutor (m).

S - Secção do semicondutor externo (m^2), obtida pela diferença entre as secções calculadas sob e sobre o semicondutor externo.

Critério de Conformidade:

O valor da resistividade deve estar de acordo com o especificado nas normas aplicáveis.

5.3.9 - Medição da $\tan \delta$

O ensaio permite avaliar o nível de perdas dielétricas nos vários tipos de isolamentos utilizados nos cabos.

Meios Utilizados:

- Transformador de alta tensão;
- Divisor de tensão;
- Condensador padrão;
- Aparelhagem de controlo;
- Ponte de medição da capacidade e $\tan \delta$;

- Terminais fim de cabo;
- Transformadores toroidais;
- Transformadores de corrente;
- Sistema de comando e controlo de temperatura;
- Sondas de temperatura (isoladas);
- Conectores.

Modo Operacional:

O ensaio é realizado numa amostra de pelo menos 10 m de comprimento de cabo a ensaiar. O ensaio é precedido pela preparação das extremidades da amostra a colocar nos terminais fim de cabo a água. A respetiva preparação é semelhante à apresentada na secção 5.1, embora estas extremidades devem conter um anel de interrupção no semiconductor externo, como se pode observar na Figura 5.26. Os terminais fim de cabo a água possuem um pequeno mecanismo que entra em contacto com esse anel.

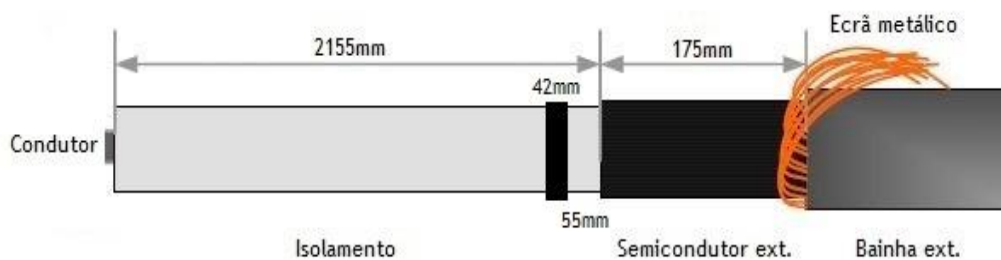


Figura 5.26 - Modo de preparar as extremidades de cabo para o ensaio de medição da $\tan \delta$, para terminais fim de cabo a água da Haefely modelo CTT 250 (adaptado de [9]).

Antes da medição da $\tan \delta$ a amostra deverá ser previamente aquecida até atingir uma temperatura entre 5°C a 10°C acima da sua temperatura de funcionamento normal com um período de estabilização cerca de 15 minutos. Para se efetuar o aquecimento da amostra, é induzida uma corrente através de um transformador toroidal, ajustando a corrente induzida (medida por um TI) na amostra em função da temperatura desejada com o auxílio do sistema de comando e controlo do aquecimento.

A montagem deste ensaio requer dois circuitos distintos: o principal com a amostra e um auxiliar com um cabo testemunho. No caso do circuito principal a amostra é colocada numa forma de “U” (de forma a facilitar a realização da montagem necessária do ensaio), onde é inserido o transformador toroidal e o transformador de corrente (TI). Após a colocação dos transformadores são inseridas os terminais fim de cabo nas extremidades da amostra, *shuntando* os dois terminais fim de cabo com um tubo ou cabo (em geral de alumínio) com uma corrente máxima admissível de funcionamento superior ou igual à da amostra.

A temperatura da amostra é controlada através do recurso a um circuito auxiliar com um cabo testemunho (cf. subsecção 5.3.4), onde são colocadas em três sondas (em geral) de temperatura na alma condutora: dois para medição real da temperatura e uma outra, de segurança, predefinida para um valor superior ao da temperatura máxima de aquecimento. No caso de ser atingido o valor limite da temperatura, todo o sistema de aquecimento do ensaio é desligado. Para além das três sondas aplicadas diretamente da alma condutora, são ainda colocadas mais duas sondas (em geral) na bainha exterior do cabo testemunho.

Na amostra são aplicadas quatro sondas (podendo ser utilizadas mais sondas) de temperatura somente na bainha exterior da amostra, permitindo que o sistema de comando e controlo de temperatura realize a leitura e compare as temperaturas em ambas as bainhas exteriores (cabo testemunho e amostra). A corrente induzida na amostra é ajustada consoante a temperatura lida na alma condutora e na bainha exterior do cabo testemunho.

As ligações elétricas (alimentação de tensão) podem ser realizadas através de um fio de cobre (ou tubo): um colocado entre o divisor de tensão e um terminal fim de cabo e um outro entre o divisor de tensão e o condensador padrão. O condensador padrão deve ser ligado ao sistema de terras do laboratório, assim como a caixa de ligações que este possui através dos respetivos pontos de massa para esse efeito. Os terminais fim de cabo não devem ser ligados ao sistema de terras uma vez que vão alterar o valor da medição (cf. Figura 5.27).

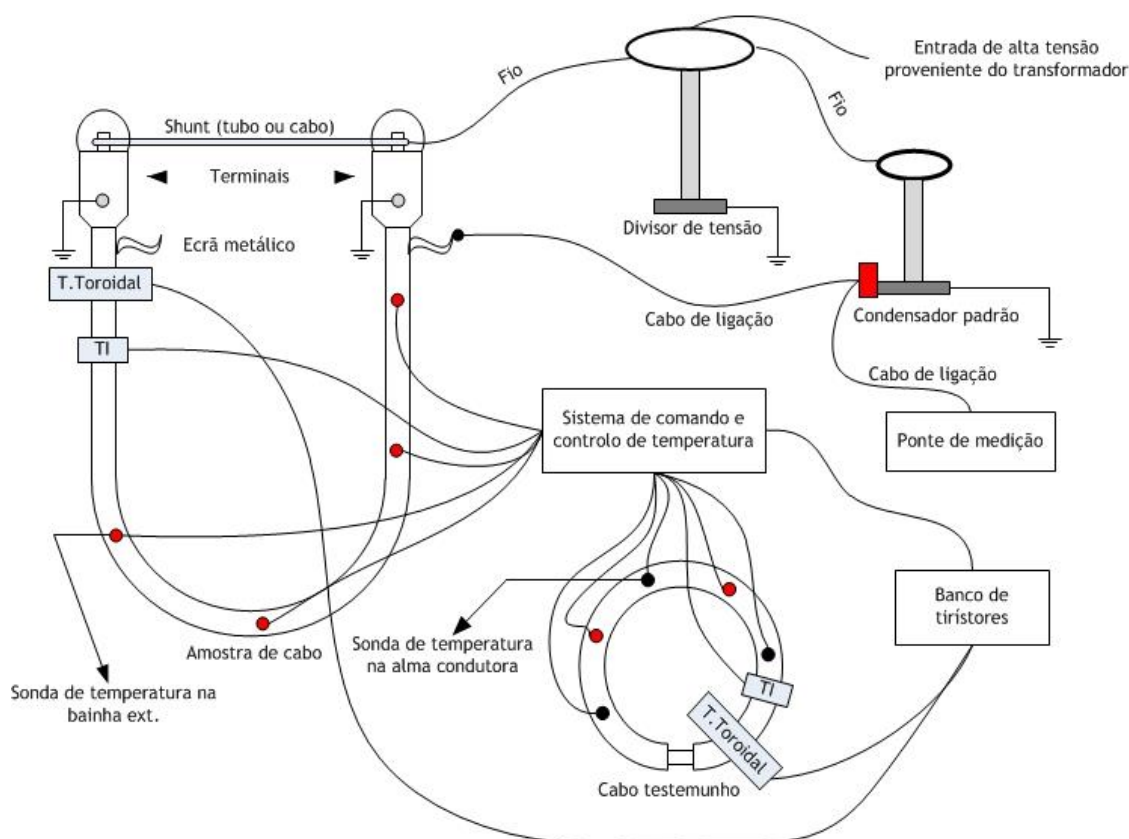


Figura 5.27 - Esquema base de montagem do ensaio de medição da $\tan \delta$.

Uma vez realizada toda a montagem do ensaio é efetuado o aquecimento com o respetivo período de estabilização e todo o sistema de aquecimento é desligado para se efetuar a medição da $\tan \delta$. Para tal deve-se ligar numa das extremidades da amostra do ecrã metálico a caixa de ligações que o condensador possui na sua base, que por sua vez possui uma ligação através de um cabo para a ponte de medição da $\tan \delta$, permitindo assim obter diretamente este valor.

O valor de tensão aplicada durante todo o ensaio, desde a fase de aquecimento até a medição da $\tan \delta$ da amostra, deve estar de acordo com as normas aplicáveis.

Na Figura 5.28 está representada a montagem da amostra principal com os respetivos equipamentos. É de salientar que em relação à Figura mencionada neste caso o ensaio está a qualificar não só o cabo mas também os respetivos acessórios (terminais fim de cabo e união).



Figura 5.28 - Montagem do ensaio de medição da $\tan \delta$, na amostra principal.

Critério de Conformidade:

Os valores obtidos da $\tan \delta$ deverão ser inferiores aos das normas aplicáveis.

5.3.10 - Medição da capacidade

O ensaio permite medir o valor da capacidade do cabo.

Meios Utilizados:

- Transformador de alta tensão;
- Divisor de tensão;
- Condensador padrão;
- Aparelhagem de controlo;
- Ponte de medição da capacidade e $\tan \delta$;
- Terminais fim de cabo;
- Conectores.

Modo Operacional:

O ensaio é realizado numa amostra de cabo completo à temperatura ambiente. Antes de se iniciar a montagem do ensaio, deve preparar-se as extremidades da amostra para que estas possam ser inseridas nos terminais fim de cabo a água (ver secção 5.1).

A montagem consiste em colocar as extremidades da amostra nos terminais fim de cabo, seguindo-se as ligações elétricas. Estas ligações consistem em ligar o divisor de tensão alimentado pelo transformador de alta tensão ao condensador padrão por intermédio de um fio de cobre (ou tubo). Liga-se também por intermédio de um fio de cobre o condensador a um terminal fim de cabo para efetuar a alimentação do cabo com tensão. Relativamente aos terminais fim de cabo, os pontos que estes possuem para ligação à terra não devem ser ligados ao sistema de terras do laboratório, uma vez que a sua ligação alteraria o valor medido da capacidade. O ecrã metálico deve ser ligado a uma das extremidades por um cabo proveniente da caixa de ligações que o condensador padrão possui, conforme representado na Figura 5.29.

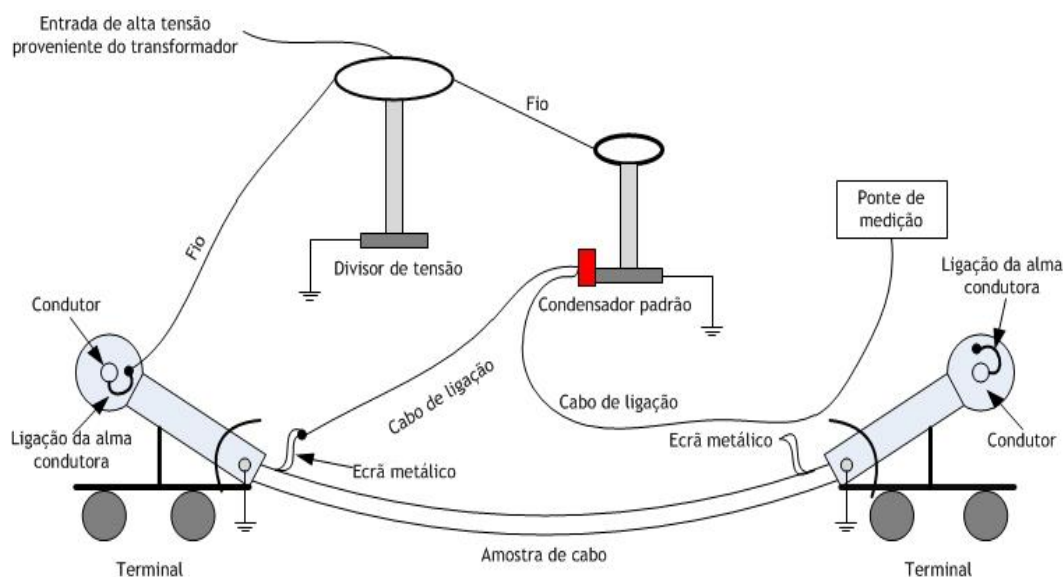


Figura 5.29 - Esquema base de montagem do ensaio de medição da capacidade.

Uma vez efetuada a montagem do ensaio aplica-se uma tensão na alma condutora entre 8 kV a 10 kV. Estes valores são os utilizados pela Solidal, uma vez que as normas das IEC não especificam os valores das tensões.

A medição da capacidade do cabo é realizada automaticamente com recurso à ponte de medição da capacidade, a qual recebe os sinais provenientes da caixa de ligações do condensador padrão através de um cabo para o efeito. O valor da capacidade obtido deve ser corrigido para um valor por km.

Na Figura 5.30 é possível observar a montagem do ensaio para a medição da capacidade do cabo, sendo este ensaio realizado somente nos ensaios de amostra nos cabos de AT ao comprimento total do cabo (bobine).



Figura 5.30 - Montagem do ensaio de medição da capacidade (ensaio de amostra).

Critério de Conformidade:

O valor da capacidade corrigido não deverá exceder o valor nominal especificado no projeto para uma dada percentagem, de acordo com as normas aplicáveis (em geral 8%).

5.4 - Resumo

Neste capítulo foram descritos os procedimentos praticados nos laboratórios da empresa Solidal para a realização dos ensaios a cabos isolados, em conformidade com as normas IEC 60502-2 e IEC 60840. Foi abordado o modo preparatório das extremidades dos cabos para os respetivos terminais fim de cabo, bem como a colocação de sondas de temperatura nos cabos. Relativamente aos ensaios, foi descrito um procedimento operacional para cada ensaio, constituído por um levantamento dos equipamentos utilizados, modo operacional e esquemas de ensaios.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo são descritas as principais conclusões, as limitações e contribuições do trabalho desenvolvido da presente dissertação. Por último, são apresentadas sugestões para possíveis trabalhos futuros.

6.1 - Principais Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo principal apoiar o LAT-FEUP, na implementação dos ensaios a cabos isolados de AT e MT, para que num futuro próximo o LAT venha adquirir competências para a sua realização.

O trabalho desenvolvido na dissertação pode ser dividido em três fases distintas: a primeira consistiu num levantamento das normas da IEC- *International Electrotechnical Commission* (CEI- Comissão Eletrotécnica Internacional) que regem os procedimentos teóricos dos ensaios a cabos isolados de AT e MT. A segunda fase correspondeu a um levantamento dos equipamentos utilizados para a realização dos ensaios. A terceira e última fase referem-se aos procedimentos técnicos que devem ser seguidos para realizar os ensaios.

Na primeira fase, correspondente ao capítulo 3, foram estudadas as normas que regem os ensaios, para cabos de AT a IEC 60840 e para os cabos de MT a IEC 60502-2, permitindo compreender os objetivos e finalidade de cada tipo de ensaio existentes nas duas normas. Para cada tipo de ensaio existente, realizou-se um levantamento dos ensaios realizados dentro de cada tipo, compreendendo as tensões utilizadas para os ensaios, bem como os critérios de conformidade para os ensaios sejam validados e ainda os procedimentos teóricos para a realização dos ensaios.

Na segunda fase, correspondente ao capítulo 4, foram realizados levantamentos dos equipamentos necessários para a realização dos ensaios a cabos isolados, estando dividido em duas partes. A primeira parte consistiu em efetuar um levantamento dos equipamentos gerais usados para os ensaios a choque atmosférico e para os ensaios à frequência industrial que o

LAT-FEUP possui atualmente. Na segunda parte efetuou-se um levantamento dos equipamentos específicos necessários para a realização dos ensaios a cabos isolados, com base dos equipamentos utilizados pelo fabricante de cabos Solidal.

Na terceira e última fase, correspondente ao capítulo 5, foram abordados os procedimentos técnicos de montagem para a realização dos diversos ensaios correspondentes a cada tipo de ensaio existentes, com recurso a todo o *know-how* adquirido ao longo dos anos no LMAT/LAT da Solidal. Como resultado, foram complementados os procedimentos teóricos referidos nas normas no capítulo 3.

Tendo em conta que o trabalho visa dar competências ao LAT-FEUP, na realização de ensaios a cabos elétricos isolados de AT e MT, com o trabalho desenvolvido da dissertação foi possível concluir na primeira fase do trabalho que existem quatro tipos de ensaios realizados em laboratórios com diferentes especificidade, os seguintes tipos de ensaios existentes na normas IEC são:

- Ensaios de Rotina;
- Ensaios de Amostra;
- Ensaios de Tipo;
- Ensaios de Pré-Qualificação.

Dentro dos quatro tipos de ensaios acima referidos, os ensaios de rotina e de amostra não estão muito enquadrados para serem implementados no LAT-FEUP, uma vez que estes dois tipos de ensaios estão mais focalizados para os fabricantes de cabos, i.e, associadas a um controlo de qualidade de fabrico do produto final, para deteção de possíveis defeitos de fabrico, permitindo assim dar garantias de qualidade dos seus produtos aos clientes. A realização destes ensaios são em grande maioria em todo o comprimento de cabo, i.e., em bobines. Contudo no caso dos ensaios de amostras estes são em todo o comprimento do cabo (em bobine) e em amostras de cabo dependendo do ensaio a ser realizado.

Relativamente aos ensaios de pré-qualificação, este tipo de ensaio é realizado somente em cabos de AT com determinadas especificidades peculiares, não estando também enquadrado para ser implementado no LAT-FEUP, uma vez que este tipo de ensaio envolve comprimentos de cabos com algumas dezenas ou centenas de metros de extensão, os quais não são possíveis de acomodar no espaço de ensaio do laboratório.

Por fim, os ensaios de tipo apresentam as condições para poderem ser realizados no LAT-FEUP, uma vez que este tipo de ensaio envolve amostras de cabo para os respetivos ensaios comprimentos na ordem de 3 a 15 metros, sendo comportável a sua realização em termos de espaço disponível no LAT-FEUP. Normalmente este tipo de ensaio é realizado uma única vez, sendo realizados uma sequência de ensaios descritos no capítulo 3 para os respetivos cabos

de AT e MT, com o intuito de comprovar o desempenho do cabo ou sistemas de cabos (cabo mais acessórios) que foram desenvolvidos em fase de projeto, antes do fornecimento para o mercado. Os ensaios de tipo são especialmente adequados a serem implementados no LAT-FEUP, atendendo a que estes ensaios podem ser realizados somente em cabos, ou então, e como mais frequente, em sistemas de cabos, i.e. cabo mais acessórios. A realização destes ensaios resulta de uma otimização da utilização de recursos: a qualificação de um cabo qualifica também os respetivos acessórios do cabo, como uniões ou terminais fim de cabo (terminais de passagem da linhas aéreas para canalizações subterrâneas).

Relativamente aos procedimentos de ensaios descritos no capítulo 5, foram referidos os procedimentos operacionais individualizados de todos os ensaios descritos dos diferentes tipos de ensaios existentes e apresentados, no capítulo 3. Contudo os procedimentos operacionais referidos não contemplam os ensaios de cabos com acessórios referidos anteriormente, atendendo ao facto de os acessórios serem montados nos cabos pelas respetivas empresas fornecedoras.

6.2 - Contribuições da Dissertação

O trabalho desenvolvido ao longo da dissertação permitiu conhecer de forma pormenorizada os procedimentos operacionais realizados a ensaios a cabos isolados de AT e MT. Os passos a seguir para implementar os ensaios no LAT-FEUP, desde do processo de preparação de extremidades do cabo para colocação dos terminais fim de cabo (água ou a óleo), até à colocação dos diversos equipamentos usados dos diversos ensaios e esquemas de montagem com os respetivos equipamentos, forneceu informação relevante e pertinente aos colaboradores do LAT-FEUP sobre a realização dos respetivos ensaios abordados nesta dissertação.

A partir deste momento o LAT-FEUP tem toda a informação que necessita para começar a implementar os procedimentos, para a realização dos ensaios de tipo a cabos isolados de AT e MT.

Em suma, uma vez efetivada a capacidade do LAT-FEUP de realizar ensaios a cabos, poderá desempenhar um papel fundamental em auxiliar os fabricantes de cabos, para a realização de ensaios em laboratórios independentes, como é o caso nos ensaios de tipo. Esta situação decorre da necessidade de validar estes ensaios, em laboratórios independentes devido a restrições impostas pelos clientes dos fabricantes de cabos. Por outro lado, a melhoria das capacidades de ensaio do laboratório poderá possibilitar parcerias com fabricantes de cabos e outras entidades para a verificação da viabilidade de novas tecnologias destinadas a serem aplicadas a cabos isolados.

6.3 - Limitações

A implementação dos ensaios de tipo (ensaios que mais se enquadram no LAT-FEUP) ficam condicionados pela falta de equipamentos. Relativamente ao levantamento efetuado no capítulo 4, verificou-se que o LAT-FEUP possui todos os equipamentos gerais para ensaios ao choque e à frequência industrial. Contudo o LAT-FEUP não possui grande parte dos equipamentos específicos referidos na secção 4.2, condicionando assim a sua implementação.

Para que venha de facto a possuir competência para realizar este tipo de ensaio (ensaios de tipo), deverá ser realizado um investimento que permita adquirir os ditos equipamentos específicos. Contudo, e como foi referido na parte final da secção 6.1, os ensaios de tipo são normalmente realizados com os respetivos acessórios para a sua qualificação (em conformidade com as normas). Neste ponto de vista, o LAT-FEUP tem atualmente as condições necessárias para começar a realizar o ensaio de tensão, ficando os outros ensaios limitados por falta de equipamentos para a realização de medições e por falta do sistema de aquecimento (sondas, transformadores, sistema de comando e controlo de temperatura).

6.4 - Possíveis Trabalhos Futuros

Em trabalhos futuros seria útil efetuar uma análise técnico-económica, com especial atenção em como/qual a melhor forma que o LAT-FEUP tem para responder às necessidades dos parceiros industriais, maximizar a utilização das instalações e minimizar os custos de investimento, e.g. questionar os parceiros sobre frequência e duração de ensaios e otimizar a utilização dos equipamentos e utilização da capacidade do laboratório.

Referências

- [1] Solidal, Guia Técnico, 2007.
- [2] J. Neves dos Santos, Condutores e Cabos de Energia: Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2005.
- [3] IEC, "Power cables with extruded insulation and their accessories - Part 2: Cables for rated voltages form 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)", IEC 60502-2, 2ª ed., 2005.
- [4] J. Mamede Filho, Manual de Equipamentos Elétricos, 3ª ed.: LCT, 2005.
- [5] G. F. Moore, Electric cables handbook/BICC Cables, 3ª ed.: Blackwell Science, 2000.
- [6] E. Kuffel, W. S. Zaengl and J. Kuffel, High-Voltage Engineering - Fundamentals, 2ª ed.: Butterworth - Heinemann, 2000.
- [7] A. Machado e Moura, Apontamentos de Técnicas da Alta Tensão: Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.
- [8] IEC, "Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV) - Test methods and requirements", IEC 60840, 4ª ed., 2011.
- [9] Solidal, Procedimento Operacional – Ensaio de rigidez dieletrica, CQLER002, 2007.
- [10] Solidal, Procedimento Operacional – Ensaio de penetração de água, CQLET036, 2007.
- [11] Solidal, Procedimento Operacional – Medição da resistividade eléctrica das camadas semicondutoras, CQLET036, 2007.
- [12] João Carlos Dias da Silva, "Cabos Elétricos de Alta Tensão – Optimização das Técnicas de Instalação para Redução das Perdas", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [13] Nuno Miguel Almeida Soares, " Inspeções periódicas em equipamentos para trabalhos em tensão (TET) – Ensaio Dielétricos", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [14] LAT– EFEI, Ensaio. Disponível em <http://www.lat-efei.org.br/ensaio.php>, acedido a 20

de Outubro de 2013.

- [15] ETH, Calibration and testing laboratory. Disponível em <http://www.eeh.ee.ethz.ch/en/power/high-voltage-laboratory.html>, acedido a 20 de Outubro de 2013.
- [16] KEMA, High & Medium Voltage Components. Disponível em <http://www.dnvkema.com/services/testing/default.aspx>, acedido a 20 de Outubro 2013.
- [17] Solidal, Procedimento Operacional – Ensaio de Impluso Atmosférico, CQLET041, 2011.
- [18] Solidal, Procedimento Operacional – Ensaio de rigidez dieléctrica de bainhas exteriores, CQLER033, 2007.
- [19] Solidal, Procedimento Operacional – Medição da resistencia óhmica, CQLER003, 2007.
- [20] Solidal, Procedimento Operacional – Medição de descargas parciais, CQLER004, 2007.
- [21] IEC, "Electric cables - Tests on extruded oversheaths with a special protective", IEC 60229, 3ª ed.,2007.
- [22] IEC, "Conductors of insulated cables", IEC 60228, 3ª ed.,2004.
- [23] IEC, "Impulse tests on cables and their accessories", IEC 60230, 1ª ed.,1966.

Anexos

Anexo A - Fatores de correção de temperatura

Tabela A.1 - Fatores de correção da temperatura da resistência do condutor para 20°C, segundo IEC 60228.

Temperature of conductor at time of measurement t °C	Correction factor, k_t All conductors	Temperature of conductor at time of measurement t °C	Correction factor, k_t All conductors
0	1,087	21	0,996
1	1,082	22	0,992
2	1,078	23	0,988
3	1,073	24	0,984
4	1,068	25	0,980
5	1,064	26	0,977
6	1,059	27	0,973
7	1,055	28	0,969
8	1,050	29	0,965
9	1,046	30	0,962
10	1,042	31	0,958
11	1,037	32	0,954
12	1,033	33	0,951
13	1,029	34	0,947
14	1,025	35	0,943
15	1,020	36	0,940
16	1,016	37	0,936
17	1,012	38	0,933
18	1,008	39	0,929
19	1,004	40	0,926
20	1,000		

Anexo B - Características Gerais do Equipamentos Utilizados nos Ensaios

Tabela B.1 - Listagem dos equipamentos utilizados nos ensaios laboratoriais.



SolidAI
Condutores Eléctricos, S.A.

Lista de equipamentos laboratoriais

N.º de cadastro	Descrição	Marca	Modelo	Alcance/Gamas de medição	Entidade calibradora
Equipamentos					
AE 0473	Ponte medição capacidade e tg delta Condensador padrão	TETTEX HAEFELY	2877 NK200	capacidade de 100pF ; tensão 200 kV.	HAEFELY
AE 0470	Calibrador portátil de D.P.	OMICRON	CAL542B	magnitudes: 1 ... 100 pC	OMICRON
AE 0474	Detector de descargas parciais	mtronix	MPD600		Calibrar antes de utilizar
AE 0478	Transformador	HIPOTRONICS	TSR350-9M0-28086	(Fonte de tensão AC de 350 kV) 9000KVA	Hipotronics
AE 0377	Terminais de água p/ ensaios A.T.	HAEFELY	CTTS 250	máx. 250 kV (água desmineralizada)	-----
AE 0472	Gerador de Ondas de Choque	HAEFELY	SGΔA 1600 - 80	máx. 1600 kV - 80 kJ	HAEFELY
AE 0469	Transformador de intensidade			Características não Especificadas	-----
CT 2268	Consola Sensores tipo J	Siemens -----	SIMATIC Touch -----		SOLIDAL
-----	Terminais de óleo p/ ensaios M.T.	Solidal	-----		-----
AE 0485	Fonte de Tensão dc	BAUR	PGK 50 E	0-10 kV e 0-50 kV dc	SOLIDAL
AE 0350	Microhmímetro digital	AOIP	OM 20	0,0001Ω - 20 kΩ	IEP
-----	Transformador toroidal	Solidal	-----		-----
-----	Divisor de tensão (choque)	HAEFELY	CR 1600 - 525	máx. 1600 kV (1,2/50 μs) ; capacidade de 525 pF	HAEFELY
CT 2104	Estufa	HERAEUS	T 6120	temp. ^a máx. 300 °C (1 °C)	SOLIDAL

Anexo C - Limitações de Equipamentos de Ensaio no LAT-FEUP

Tabela C.1 - Comparação dos equipamentos existentes nos LAT's, para a realização dos ensaios.

Ensaio/Medições	Equipamentos	
	Utilizados – LMAT/LAT da Solidal	Existentes LAT-FEUP
Medição de descargas parciais	<ul style="list-style-type: none"> • Terminais fim de cabo; • Transformador de alta tensão; • Divisor de tensão; • Condensador; • Calibrador de descargas parciais; • Aparelhagem de medida de descargas; • Aparelhagem de controlo. 	x x x
Medição da resistência elétrica	<ul style="list-style-type: none"> • Microhmímetro; • Termómetro; 	x x
Medição da resistividade elétrica dos semicondutores	<ul style="list-style-type: none"> • Estufa; • Circuito elétrico; • Equipamento de corte. 	x
Medição da $\tan \delta$	<ul style="list-style-type: none"> • Transformador de alta tensão; • Divisor de tensão; • Condensador padrão; • Aparelhagem de controlo; • Ponte de medição da capacidade e $\tan \delta$; • Terminais fim de cabo; • Transformador toroidal; • Transformador de corrente; • Sistema de comando e controlo de temperatura; • Sondas de temperatura; 	x x x
Medição da capacidade	<ul style="list-style-type: none"> • Transformador de alta tensão; • Divisor de tensão; • Condensador padrão; • Aparelhagem de controlo; • Ponte de medição da capacidade e $\tan \delta$; • Terminais fim de cabo. 	x x x
Ensaio penetração de água	<ul style="list-style-type: none"> • Transformador de corrente; • Transformador toroidal; • Sondas de temperatura; • Sistema de comando e controlo de temperatura; • Aparelho de penetração de água. 	
Ensaio de tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Terminais fim de cabo; • Transformador de alta tensão; • Divisor de tensão; • Aparelhagem de controlo. 	x x x

Ensaio de rigidez dielétrica de bainhas exteriores	<ul style="list-style-type: none"> • Fonte de tensão de corrente contínua. 	
Ensaio de ciclos de aquecimento	<ul style="list-style-type: none"> • Transformador de alta tensão; • Transformador de corrente; • Transformador toroidal; • Terminais fim de cabo; • Sistema de comando e controlo de temperatura; • Sondas de temperatura; • Aparelhagem de controlo. 	<p>×</p> <p>×</p>
Ensaio de choque atmosférico	<ul style="list-style-type: none"> • Gerador de choque; • Sistema de comando do gerador de choque; • Sistema de aquisição das formas de onda; • Transformador toroidal; • Transformador de corrente; • Divisor de tensão; • Sistema de comando e controlo de temperatura; • Sondas de temperatura; • Terminais fim de cabo. 	<p>×</p> <p>×</p> <p>×</p> <p>×</p>